**Elektronica en Telecommunicatie** 2\3

Gemeenschappelijke publikatie van de Sectie voor Telecommunicatietechniek van het K.I.v.I. en het Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap.

Redactie-adres: Prinsessegracht 23, Den Haag.

Redactiecommissie:

Ir. K. Vredenbregt (voorzitter), ir. J. Dijk, prof. dr. ir. H. J. Frankena, ir. E. Goldbohm, ir. O. B. Ph. Rikkert de Koe, ir. M. Steffelaar, ir. J. Vermeulen (leden)

# Symposium Elektronische Navigatie

## Ter gelegenheid van het 25-jarig buitengewoon hoogleraarschap van prof. jhr. ir. J. L. W. C. von Weiler

### I. Terugblik door prof. dr. ir. J. P. Schouten, oud-hoogleraar aan de Afdeling der Elektrotechniek, T.H. Delft

Het symposium, gewijd aan de Elektronische Navigatie, gehouden ter gelegenheid van het 25-jarig jubileum van prof. jhr. ir. J. L. W. C. von Weiler, heeft ons een blik gegund op de nog steeds doorgaande ontwikkeling van een groot gebied van de elektrotechniek en van de activiteiten die prof. Von Weiler hieraan heeft gewijd.

Als oud-hoogleraar en oud-collega van prof. Von Weiler zij het mij vergund een blik terug te mogen werpen op de vijf en twintig jaar die voorbij gingen en gedurende welke periode prof. Von Weiler op 'buitengewone' wijze zijn onderwijstaak aan de Technische Hogeschool Delft vervulde.

Aan het einde van de oorlog in 1945 verkeerde de Technische Hogeschool in een zeer deplorabele toestand. De Afdeling der Elektrotechniek, die ons in de eerste plaats aanging was vrijwel ontvolkt. De hoogleraren Hallo, Elias, beiden aan het einde van hun carrière, en prof. Bähler stonden voor de immense taak de afdeling weer op gang te brengen! Bedenkt men dat juist gedurende de oorlog in de elektrotechniek geweldige vorderingen waren gemaakt, waarvan de kennis niet tot het bezette Nederland was doorgedrongen; en bedenkt men tevens dat de laboratoriumzalen vrijwel leegstonden en tegelijkertijd een grote toevloed van studenten te wachten stond, dan beseft men enigermate welke taak hier te vervullen viel. Onder leiding van collega Bähler toog men aan het werk. Bij de aanvang van het herstel was de belangrijkste taak het wetenschappelijk onderwijs weer op gang te brengen.

Dat juist de Technische Hogeschool in het centrum van de belangstelling stond is wel zeer begrijpelijk. Niet alleen de wederopbouw van veel dat vernietigd was, maar ook de ombouw van Nederlands economisch en staatkundig leven vereiste veel technische voorzieningen. Het einde van het koloniale tijdperk maakte industrialisatie tot een zaak van levensbehoud voor Nederland. Dat daarbij de elektrotechniek een grote rol zou spelen stond van de aanvang af vast. Populair en maatschappelijk bezien kan men de elektrotechniek in die tijd wel in drie gebieden verdelen, t.w. elektrische centrales met hun gehele verzorgingsgebied, de PTT-diensten telegrafie en telefonie, terwijl alles wat daarbuiten viel elektronica genoemd zou kunnen worden. Daar een der aanwezige docenten in eerste aanloop de techniek van de elektrische centrales kon blijven behandelen, maar de leerstoel voor de elektrische machines leegstond, was één der eerste benoemingen die van prof. De Lange, welke reeds in 1946 plaatsvond.

De PTT-diensten werden in eerste aanleg door de hoogleraar Bähler vertegenwoordigd. Het is daarom wel duidelijk, dat de elektronica allereerst de aandacht kreeg die zij verdiende en de lector Huydts in 1946 tot gewoon hoogleraar in dit vak werd benoemd. Daar wij hier in Nederland gedurende de oorlogsjaren vrijwel geen deel hadden gehad aan de geweldige ontwikkelingen die in die tijd zowel in de Verenigde Staten van Amerika als in Groot-Brittannië op het terrein van de zeer hoge frequenties hadden plaats gehad – een gebied dat juist onze sterke belangstelling had; óók in Nederland waren 'aanlopen' daartoe gemaakt – lag het zeer voor de hand hieraan grote aandacht te schenken. Het sprak vanzelf om juist ingenieur Von Weiler uit te nodigen een onderwijstaak op dit gebied te gaan vervullen. Het hierna weergegevene toont wel aan hoezeer prof. Von Weiler zich zowel vóór, tijdens, als na de Tweede Wereldoorlog met de elektronische navigatie heeft beziggehouden. En dat niet alleen experimenteel en wetenschappelijk maar ook metterdaad en praktisch.

Hij heeft de Afdeling der Elektrotechniek en door haar vele elektrotechnici blijvend aan zich verplicht door reeds in 1946 als buitengewoon hoogleraar, naast zijn vele werkzaamheden

en verplichtingen, een onderwijstaak op dit gebied op zich te nemen.

Met de hier geschetste gebeurtenissen en ontwikkelingen in 1946 was de aanloopperiode van deze afdeling naar een volledige bezetting nog maar net begonnen. In de jaren 1947-1948 en 1949 kwamen in snelle opeenvolging vele benoemingen tot stand. Wij kunnen denken aan de benoemingen van ir. Fontein tot gewoon hoogleraar op het gebied van de elektriciteitsvoorziening; aan die van ir. De Zoeten voor transmissie bij hoge spanning en aan die van Schouten voor het onderwijs in theoretische vakken, waarvan een zeer essentieel vak, de netwerktheorie, werd toevertrouwd aan ir. B. D. H. Tellegen, die als buitengewoon hoogleraar 21 jaar de Hogeschool heeft gediend en op dit gebied baanbrekend werk heeft verricht.

In 1949 kwam ook de benoeming van ir. Van Soest tot buitengewoon hoogleraar, die zich ging bezighouden met ruisverschijnselen maar vooral – en heet van de naald – met de informatie- en communicatietheorie.

De moderne ontwikkelingen op het gebied van de telefonie werden niet vergeten. Hiervan getuigen de benoemingen van ir. Bast, ir. Unk en van dr. ir. Oberman om als buitengewoon hoogleraar onderwijs te geven resp. in de telefoontransmissie, in de moderne ontwikkeling van telefooncentrales, in het bijzonder onder toepassing van de zgn. Unk-kiezer en in moderne telegrafie en telefonie in het algemeen. Gedurende de jaren vijftig heeft de afdeling in hoofdzaak in de beschreven samenstelling gewerkt.

Er waren in die jaren groepen studenten in de afdeling die bijzonder hard werkten, blijk gaven van grote begaafdheid en voor ons docenten een aansporing vormden om ons in te spannen ten einde het onderwijs op het peil te brengen dat nodig was om de toekomstige ingenieurs vertrouwd te maken met de moderne ontwikkelingen in de elektrotechniek. Denken wij aan de vakken die door prof. Von Weiler in die jaren werden gedoceerd – uit de tijdens het symposium over Elektronische Navigatie gehouden voordrachten is wel gebleken welke dat waren – dan is het duidelijk dat juist de microgolftechniek hiervan een zeer belangrijk onderdeel uitmaakte.

De herontdekking omstreeks 1936 van de mogelijkheid van de voortplanting van centimetergolven door holle geleiders, de ontwikkeling van de energiebronnen hiervoor, het magnetron, het klystron, de lopende-golfbuizen, de opbouw van parabolische en andersoortige grote antennes vormden onderwerpen voor het grijpen voor degenen die hierop wilden studeren. Het hiervoor gestichte zgn. microgolflaboratorium gaf prof. Von Weiler herhaaldelijk aanleiding zijn studenten met taken te belasten, die in dit laboratorium konden worden uitgevoerd.

In de vijf en twintig jaren, gedurende welke prof. Von Weiler de Technische Hogeschool heeft gediend is er hard gewerkt, er is veel gebeurd en er is veel veranderd!

Als oud-hoogleraar is uw verslaggever geneigd, op deze periode terugziend, hier tegenover een filosofische houding aan te nemen. Beschouwt men de huidige bezetting van de Afdeling der Elektrotechniek van de Technische Hogeschool Delft, dan ziet men dat verreweg de meeste docenten nà 1959 zijn benoemd. Op een enkele uitzondering na zijn deze docenten afgestudeerd na de Tweede Wereldoorlog. Prof. Von Weiler heeft dus van vrijwel allen van hen meegemaakt dat zij hun ingenieursdiploma in ontvangst kwamen nemen. Verder kunnen wij vaststellen, dat vrijwel allen in de jaren zestig zijn benoemd en wel zo ongeveer tien jaar na hun afstuderen.

Schat men vervolgens de tijd, nodig om als docent tot ontplooiing te komen, eveneens op tien jaren, dan zijn we aangeland in de jaren zeventig. Van de mannen van het eerste uur zijn nog maar enkelen over. Men kan wel zeggen dat zij gegeven hebben wat zij te geven hadden!

De zin van het hoogleraarschap ligt in het levendige contact



**Fig. 1.** Prof. dr. ir. J. P. Schouten overhandigt aan prof. jhr. ir. J. L. W. C. von Weiler de gedenkpenning, vervaardigd t.g.v. diens 25-jarig ambstjubileum. Geheel links mevrouw E. K. von Weiler-Haas.

met jonge begaafde studenten, hetgeen inspireert tot hard werken en de mogelijkheid biedt tot de diepere gronden van de menselijke kennis door te dringen.

De ideale carrière van een docent zou men, generaliserend, in vier perioden van tien jaar kunnen verdelen. Na het behalen van een wetenschappelijk of universiteitsdiploma een periode van tien jaar van ontwikkeling en rijping tot het niveau van wetenschapsbeoefenaar en docent. Daarna tien jaar om uit te groeien tot een voor zijn taak berekende geleerde en het afleveren van afstudeerders, o.w. er zijn die zich tot hoogleraar kunnen ontwikkelen. In de derde periode vruchtbaar werk in onderwijs en wetenschap in samenwerking met jonge afgestudeerden, die als wetenschappelijk ambtenaar werkzaam blijven. In de vierde periode nieuw benoemde jonge hoogleraren introduceren en enige tijd begeleiden en zich ermee vertrouwd maken dat de eigen carrière is afgelopen.

Dit laatste zal prof. Von Weiler als wijs man zeker niet zwaar vallen en het zal hem niet al te lang doen verwijlen bij onherroepelijke veranderingen. Wij, de Afdeling der Elektrotechniek in haar geheel, de afstudeerders, alle oud-hoogleraren van onze afdeling, als wier woordvoerder ik mij moge opwerpen, wensen prof. Von Weiler en mevrouw Von Weiler van harte geluk bij dit jubileum nu het 25 jaren geleden is dat hij het buitengewoon ambt aanvaardde – en dat hij op zo buitengewone wijze heeft vervuld.

Moge Uw verslaggever, alvorens te eindigen, namens de commissie van voorbereiding al diegenen danken, die hebben bijgedragen aan de voorbereiding en organisatie van het symposium, in het bijzonder de sprekers en de besturen van de Afdeling voor Elektrotechniek van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs en van het Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap.

Onze dankbaarheid betreft al diegenen die binnenshuis veel voorbereidend werk hebben verricht doch richt zich ook op al die diensten, die in samenwerking iets definitiefs en van blijvende waarde tot stand hebben gebracht.

Met een hartelijk applaus gaven de aanwezigen hierna van hun instemming blijk, toen prof. Schouten aan prof. Von Weiler de gedenkpenning overhandigde die in duidelijke tekst en symboliek een blijvende herinnering bedoelt te zijn niet alleen aan zijn werkzaamheden binnen de Afdeling der Elektrotechniek gedurende de jaren vanaf 1946 ... 1971, maar vooral ook aan de technische ontwikkelingen waaraan hij als vakman zoveel heeft bijgedragen.

*

* *

621.396:527

# II. Drieluik: Geboorte van de elektronische navigatie in ons land

**Synopsis:** *The Birth of Electronic Navigation in the Netherlands*
In three sections a sketch is given of the development of electronic navigation in the Netherlands.

Section IIa., '*Radar and Von Weiler*', contains a description of the way by which in 1936 radar was invented by Von Weiler in the Physics Laboratory of the National Defence.

In section IIb. is reported about the Netherlands radar during the years of the Second World War.

Finally, in section IIc. a comparison is made between the radar techniques of 1946 and those in use to-day.

## IIa. Radar en Von Weiler

### door prof. dr. ir. J. L. van Soest

oud-buitengewoon hoogleraar aan de Afdeling der Elektrotechniek, T.H. Delft *)



Het was in de jaren dertig dat Von Weiler zich bezighield met geavanceerde research en ontwikkeling op het gebied van draagbare ultrakortegolfzenders en -ontvangers, ongeveer in het gebied van 1 ... 1,5 m golflengte. Gezien de nog weinig efficiënte buizen en andere elektrische onderdelen, was dit in die dagen een moeilijke taak. Het bleek echter mogelijk deze semi-optische golven nuttig voor telefooncommunicatie te gebruiken, temeer

Voordrachten, gehouden voor de Afdeling voor Elektrotechniek van het KIvI en voor het Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap, in het gebouw voor Elektrotechniek, T.H. Delft, op vrijdag 17 september 1971. Zie voor de aankondiging 'De Ingenieur' 1971, nr. 33, blz. A 581.

*) Literatuur: VAN SOEST, ir. J. L. 'Speurwerk van luistertoestel tot radar'; voordracht nr. 1, 'De Ingenieur' 1949, blz. Mk 38.

omdat het optische karakter minder storend was dan werd verwacht. Op redelijk grote afstanden, bijv. van 10 km, bleek de afschermende werking van obstakels in de transmissieweg niet al te erg. Zo was het nog mogelijk om, aan de grens van een in ruis bijna verdrinkend signaal, communicatie te verzorgen tussen de Wassenaarse duinen en Voorschoten ondanks het boscomplex van Wassenaar daar tussenin.

Het was op een keer (1936), toen ik deze proeven bijwoonde dat gedurende korte tijd op opvallende wijze het signaal vrij snel periodiek in sterkte wisselde alsof er een interferentie plaatsvond. Enige ogenblikken later herhaalde zich het verschijnsel, waarbij ik aan Von Weiler de vraag stelde: 'Het kan toch niet met die overvliegende kraai te maken hebben?' Enige tijd later herhaalde zich de periodieke wisseling tijdens het overvliegen van een zilvermeeuw. Op ons verzoek koerste de volgende dag een vliegtuig heen en weer tussen Noordwijk en Hoek van Holland. De interferenties waren duidelijk; kennelijk was er sprake van een reflectie van de radiogolf tegen kraai, meeuw resp. vliegtuig, waarbij de gereflecteerde golf met de directe interfereerde.

De reactie van Von Weiler was snel. Als het kan, wanneer zender en ontvanger op afstand staan, moet het óók kunnen als zij dicht bijeen staan. Voorzien van een richtantenne zou men dan een vliegtuig op richting kunnen peilen. Maar méér nog: wellicht zou ook een afstandsbepaling mogelijk zijn. Als het uitgezonden signaal een korte puls zou zijn, welke na reflectie door de ontvanger zou worden geregistreerd, dan zouden uitzend-tijdstip en ontvang-tijdstip een tijdsverschil, dus ook een afstand kunnen opleveren. Het pulssysteem moest dan echter bijzonder goed zijn; dat was een moeilijke taak in die dagen.

Wilden bovendien zender en ontvanger bijeen kunnen staan en, zo mogelijk, van één antenne gebruik maken, dan diende de ontvanger, althans na uiterst korte tijd, de directe inductie van de zendpuls te boven te zijn gekomen. In bijzonder korte tijd was dit plan in het brein van Von Weiler opgekomen. De uitwerking van een proefmodel en daarna van een prototype vergde een paar jaar.

Deze ontwikkeling bracht een zeer belangrijke toepassingsmogelijkheid met zich mee. Het was, zoals reeds gezegd, de mogelijkheid om een vliegtuig in richting en afstand op te sporen en het te volgen. Het toestel werd 'elektrisch luistertoestel' genoemd, een vreemde naam, die in de historie van het (akoestisch) opsporen van vliegtuigen zijn oorsprong vond. In Engeland is men voor deze ontwikkeling van uitgezonden en gereflecteerde radiogolven en voor de daarbij toegepaste apparatuur de naam 'radar' gaan gebruiken, maar het onderzoek dáár was in Nederland natuurlijk niet bekend.

Het was in die dagen een moeilijke taak om vliegtuigen op te sporen; afstandsbepaling was niet mogelijk omdat men slechts op passieve wijze met geluid kon waarnemen. De optische waarneming met het oog of met behulp van kijkers en met gebruikmaking van zoeklichten en optische afstandmeters, laten wij hier geheel buiten beschouwing. De zgn. luistertoestellen hadden weliswaar een zeker raffinement bereikt, maar de steeds toenemende en dus ongunstiger wordende verhouding van vliegsnelheid t.o.v. geluidssnelheid maakte een richtingsbepaling vrijwel hopeloos.

Het zgn. elektrische luistertoestel betekende tevens een eerste stap naar de elektronische navigatiemethodiek. Von Weiler, met een kleine groep van ingenieurs, onder wie ir. Gratama in de eerste plaats, bijgestaan door bekwame elektronici en instrumentmakers, bracht in verwonderlijk korte tijd het proefmodel tot stand. Daarna werd het prototype ten behoeve van een seriefabricage vervaardigd. De resultaten met beide toestellen waren gunstig.

Bij de opdrachtgevers was de toekomstvisie over deze ontwikkeling verdeeld; er waren er die het grote belang inzagen; anderen beoordeelden de gang van zaken als een 'vloek der perfectie': de seriefabricage mocht niet door het Laboratorium worden uitgevoerd, omdat dit slechts research tot taak had. De tekeningen gingen daarom naar de industrie, in casu de Nederlandsche Seintoestellenfabriek (thans P.T.I.); daarbij werd ir. Staal als verbindingsman aangewezen.

De oorlogsdreiging werd in die tijd steeds heviger. Op de dag van de Duitse inval stond één toestel, door het Laboratorium vervaardigd, op het dak gereed voor een demonstratie in samenwerking met een, door Insje vervaardigd, proefmodel van een I.F.F. (zoals het tegenwoordig heet): *identificatie van vriend en vijand.* De demonstratie ging natuurlijk niet door; het elektrische luistertoestel belandde die dag in de Haagse Koekamp, staande naast een mitrailleur; meer kon niet geïmproviseerd worden! Vóórdat de Duitsers binnentrokken was het toestel door eigen handgranaten tot een vormloze massa geworden.

Het andere toestel werd ingepakt en onder leiding van ir. Piket – door gebied dat door parachutisten onveilig was geworden – naar Zandvoort vervoerd en vervolgens naar Engeland verscheept. In de laatste dagen vóórdat de Duitser ter plaatste was haalde Von Weiler bij mij thuis de tekeningen op, die veiligheidshalve onder mijn bed waren opgeborgen; hij vertrok via Scheveningen naar Engeland, evenals Staal.

Voor Nederland viel het scherm . . . . .

*

* *



# IIb. Engelandvaarders


## door ir. M. Staal

Technisch Directeur N.V. Hollandse Signaalapparaten, Hengelo


Een schaalmodel van de eerste Nederlandse radar is afgebeeld in fig. 1. Deze radar is ontwikkeld door Jhr. ir. Von Weiler en zijn medewerkers in het Physisch Laboratorium te Waalsdorp in de periode van 1935 ... mei 1940. Ik heb mij ook tot deze medewerkers mogen rekenen.

Ook vroeger kon men uitstel krijgen van militaire dienst totdat men was afgestudeerd. Medio 1939 werd ik als pas afgestudeerd ingenieur toegevoegd aan de groep van Von Weiler om mijn militaire dienstplicht te vervullen. Op deze wijze kwam ik in aanraking met de eerste Nederlandse radar.

De ontwikkeling was toen zo ver gevorderd, dat een voorserie van 10 apparaten in produktie was genomen. De vervaardiging vond plaats in de werkplaatsen van de T.H. Delft, van het Physisch Laboratorium van de Universiteit van Leiden en bij enkele fabrieken. Het was mijn taak in deze produktie coördinerend op te treden. Begin 1940 werd een opdracht geplaatst voor een serie van 50 stuks bij de toenmalige N.S.F. (Nederlandsche Seintoestellen Fabriek), de huidige P.T.I. (Philips Telecommunicatie Industrie) te Hilversum.

Toen in mei 1940 voor Nederland de oorlog uitbrak is de Marine erin geslaagd een Nederlands radarapparaat naar Engeland te verschepen. In de zeer vroege morgen van de 14e mei 1940, voor Nederland de dag van de capitulatie, is Jhr. ir. Von Weiler op verzoek van de Marinestaf vertrokken naar Engeland aan boord van een Engels oorlogsschip. Om 4 uur die morgen had hij mij gewekt met de vraag: 'Ga je mee naar Engeland?' Toen ik zei dat ik wel een paar dagen nodig had om mijn zaken te regelen vroeg hij: 'Als ik over tien minuten terugkom, ben je dan klaar?'

Zo gingen de heer Von Weiler en ik naar Engeland, waar wij geplaatst werden bij het Laboratorium van de Engelse Marine, bij de zgn. Signal School te Portsmouth.



**Fig. 1.** Schaalmodel van de eerste Nederlandse radar.

Een zeer korte omschrijving van het eerste Nederlandse radartoestel is hier op zijn plaats.

Het radartoestel was bestemd om te worden ingezet bij de opsporing van vliegtuigen, speciaal 's nachts. Na detectie door de radar moesten zoeklichten het vliegtuig volgen met hun lichtbundels, ten einde luchtafweergeschut in te kunnen zetten.

Het radartoestel bestond uit een antennedeel en een elektronisch deel (fig. 2). De antenne was opgebouwd op een mast en kon draaien in azimut en elevatie. De constructie was semimobiel; de beweging gebeurde door de bedieningsman met behulp van hand- en voetbediening. Op de kathodestraalbuis werden de radarecho's radiaal afgebeeld op de cirkel.

De afstand kon met grote nauwkeurigheid worden afgelezen. Een hoofdtelefoon maakte het mogelijk de radarecho te horen. De toegepaste golflengte was 70 cm; de verkrijgbare elektronenbuizen maakten toentertijd niet veel kortere golflengten mogelijk. Het piekvermogen bedroeg enkele honderden watt.

De uitgezonden puls was enige microseconden lang, de herhalingsfrequentie was naar keuze 15 000 of 7500 pulsen per seconde. De bereikbare afstand werd hierdoor 10 resp. 20 km. De pulslengte werd gemoduleerd met 1000 Hz ten einde later de ontvangen echo met behulp van een hoofdtelefoon hoorbaar te kunnen maken. De energie van de zender werd met een koppellus afgetakt uit een afgestemde trilholte; deze lus werd gekoppeld met een coaxiale leiding die de antenne voedde. De antenne bestond uit een stelsel van parallelgeschakelde dipolen, aangebracht op een gaasmat. De ontvangen energie werd via de coaxiale leiding naar de ontvanger geleid. Deze ontvanger was vlak bij de zender opgesteld. De eerste versterkerbuis van de ontvanger was een miniatuur triode, een zgn. eikellampje.

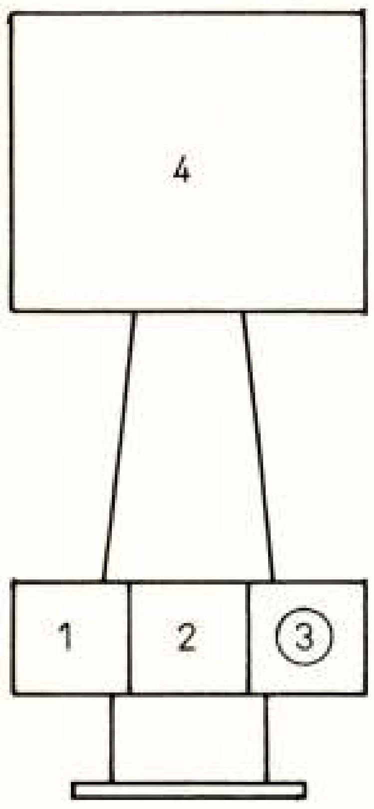



**Fig. 2.** Samenstelling van de eerste Nederlandse radar. (1) zender; (2) ontvanger; (3) kathodestraalbuis; (4) antenne.

In tegenstelling tot de op dat moment in Engeland in ontwikkeling verkerende radars, had de eerste Nederlandse radar reeds het grote voordeel van één antenne, die zowel voor zenden als ontvangen gebruikt werd. Het mechanisme waardoor dit mogelijk was, werkte als volgt:

Zowel de zenderkring als de ontvangerkring zijn afgestemd met behulp van de ruimtelading tussen de elektroden. Wordt deze ruimtelading weggezogen, dan verandert de capaciteit tussen de elektroden. De antenne is zowel met de zender als met de ontvanger gekoppeld. Tijdens zenden raakt de ontvangerketen uit zijn afstemming door het wegzuigen van de ruimtelading, waardoor de zendenergie naar de antenne gaat en slechts een gering vermogen in de ontvanger wordt gedissipeerd. Tijdens ontvangen gaat de energie hoofdzakelijk naar de ontvanger en slechts zeer ten dele naar de zender.

Alle elementen die een moderne radar heeft waren reeds aanwezig in de eerste Nederlandse radar. Het later toegepaste panoramascherm was in zeer eenvoudige vorm aanwezig, nl. als een registratietoestel waarmee, als de bedieningsman een echo waarnam, azimut en elevatie werden geregistreerd.

Eén van de radars werd tijdens de oorlogsdagen van 10 tot 14 mei 1940 opgesteld in 's-Gravenhage. Volgens door mij nooit geverifieerde geruchten zou men hiermee zoeklichten op vijandelijke vliegtuigen hebben weten te richten.

De Engelse autoriteiten waren eerst zeer verbaasd en ongelovig toen hen werd verteld dat er in Nederland een 'radar' was ontwikkeld. Speciaal de enkele antenne had hun grote bewondering. Door Engelse technici werden vele lastige vragen gesteld, maar na enige uren moest men wel tot de conclusie komen dat er inderdaad een werkende Nederlandse radar bestond.

Jhr. ir. Von Weiler werd geplaatst bij de Signal School te Portsmouth. De Nederlandse radar, die in Engeland was aangekomen, werd omgebouwd voor gebruik aan boord van Nederlandse oorlogsschepen. De antenne werd vervangen door Yagi-antennes, die beter geschikt waren om te worden samengebouwd met Bofors 40-mm kanons waarmee de Nederlandse marineschepen waren uitgerust.

Naast werkzaamheden aan deze Nederlandse radar zijn door prof. Von Weiler onderzoekingen verricht inzake antennes, op het gebied van elektronische oorlogvoering, anti-jammingmaatregelen in radar. Tevens werd gewerkt aan 'cable-borne interference'. Hieruit resulteerden o.a. dubbel afgeschermde kabels.



**Fig. 3.** Opstelling van een aantal radarantennes aan boord van een schip.

Onderzoekingen werden gedaan aan een Duitse radar, afkomstig uit een gezonken Duitse onderzeeboot.

Na terugkeer in Nederland heeft prof. Von Weiler (in 1946 benoemd tot buitengewoon hoogleraar (radiotechniek) aan de T.H. Delft) zich zeer intensief ingezet voor de ontwikkeling en

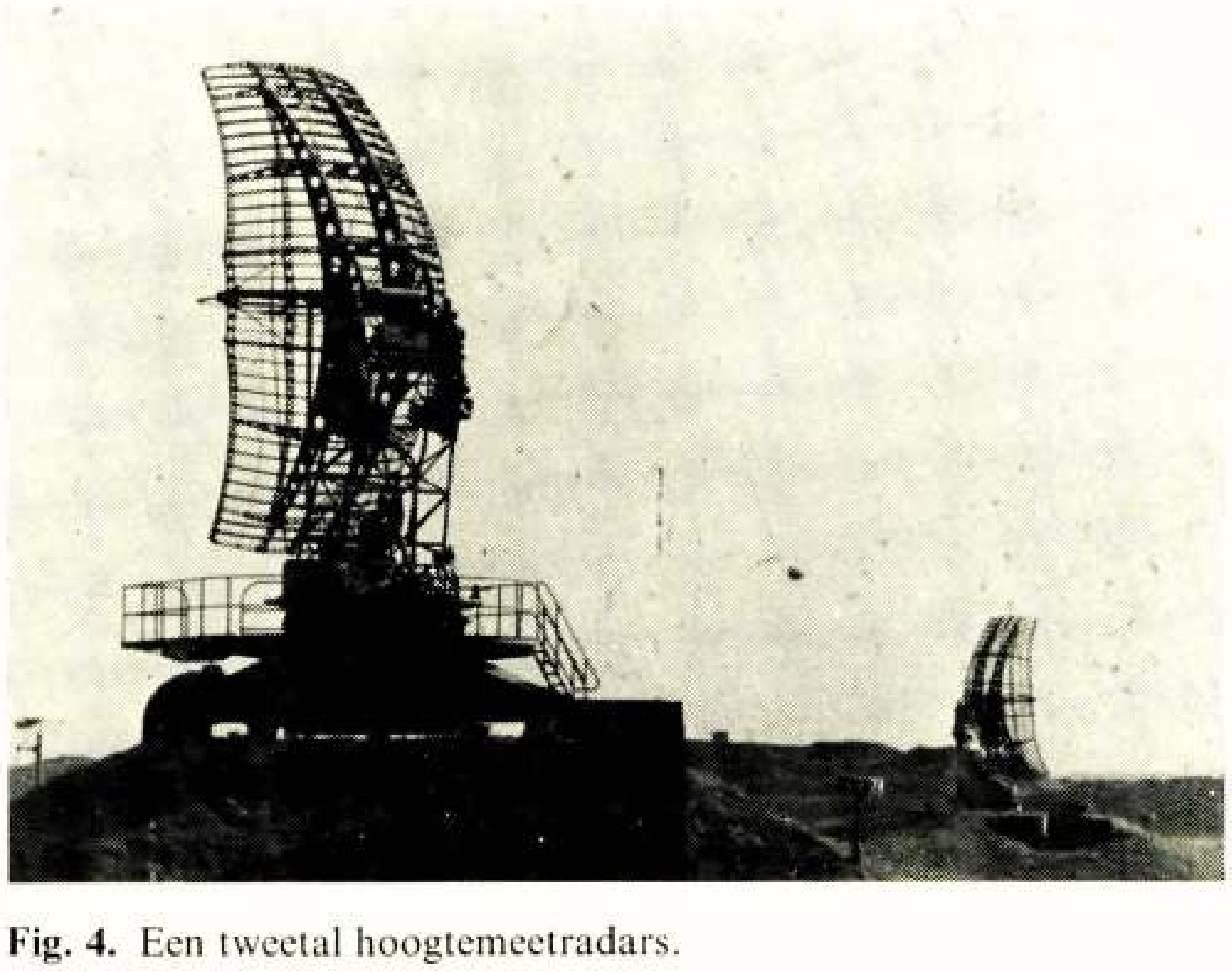


**Fig. 4.** Een tweetal hoogtemeetradars.

fabricage van gestandaardiseerde radar-apparatuur in Nederland. Hierbij werden experts van Marine, Leger en Luchtmacht samengebracht.

De resultaten waren rondzoek- en vuurleidingradars voor Marine en Luchtmacht. In fig. 3 is een groep van antennes afgebeeld. De grootste reikwijdte wordt gehaald door een 25-cm rondzoekradar. Een afgeleide hiervan staat op Schiphol. Hiermee wordt honderden kilometers ver gekeken.

Daarnaast zijn er 10-cm radars ontwikkeld voor waarschuwing en doelaanwijzing. Op Schiphol staat een hiervan afgeleid type voor de zgn. Terminal Approach. Daarnaast is er een 3-cm rondzoekradar ontwikkeld voor het opsporen van schepen. Ook hoogte-meetradars zijn ontwikkeld; voor de luchtmacht zijn er hoogte-meetradars ontwikkeld die nog steeds volop in gebruik zijn, 20 jaar nadat de ontwikkeling hiervan is gestart (fig. 4).

Ik kan niet eindigen dan na gereleveerd te hebben dat de werkzaamheden van prof. Von Weiler en zijn groep bij het Physisch Laboratorium, waar prof. Van Soest toen directeur was, ertoe hebben geleid dat er nu een industrie in Nederland bestaat waarin 3000 man werkzaam zijn. Deze industrie levert hoofdzakelijk aan het buitenland.

De meeste radars, na de oorlog ontwikkeld op instigatie van prof. Von Weiler, zijn nog steeds in gebruik, hetgeen een getuigenis is van de vooruitziende blik van onze jubilaris.

*

* *

## IIc. De periode 1946 . . . 1971

**door ir. F. J. van Hutten,** Directeur Laboratorium Elektronische Ontwikkelingen voor de Krijgsmacht, Oegstgeest

In de beide voorafgaande hoofdstukken werd verteld, welke rol prof. Von Weiler bij het begin van de radarontwikkeling in ons land heeft gespeeld. Ik wil U terugvoeren naar de techniek en in het kort aangegeven, wat de periode 1946 ... 1971 op dit terrein heeft gebracht.

Kort na Wereldoorlog II is veel know-how in Nederland ingebracht in de vorm van oorlogservaring bij militair personeel, speciaal van de Koninklijke Marine, dat na actieve dienst in Nederland terugkeerde. Anderzijds werd van Amerikaanse en Engelse zijde uitvoerig gepubliceerd over bijna alle facetten van de radartechniek. Beide factoren hebben zeker ertoe bijgedragen, dat op dit gebied de Nederlandse industrie, en ook de krijgsmacht, de in de oorlogsjaren uiteraard ontstane technische achterstand snel heeft kunnen inlopen. Ook hierbij heeft prof. Von Weiler een rol van bijzondere betekenis gespeeld.

In het algemeen gesproken geven de jaren na 1946 een snelle ontplooiing te zien naar velerlei toepassingen, zoals navigatiedoeleinden, bewaking van havens en waterwegen, luchtverkeersregeling, meteorologische metingen, enz. Deze verscheidenheid van toepassingen heeft ook geleid tot apparatuur van sterk verschillende omvang en complexiteit, van enerzijds controle van snelheidsmeting op autowegen, tot anderzijds grote ingewikkelde systemen als bijv. luchtverkeersbeveiliging op vliegvelden.

De meest markante feiten in deze periode zijn wel geweest de invoering van halfgeleiderelementen en, bij uitgebreide systemen, het streven naar automatisering met behulp van de inmiddels praktisch bruikbaar geworden digitale rekenmachines en de ontwikkeling van diverse typen microgolf-zendbuizen. Deze evolutie, die natuurlijk niet alleen in Nederland heeft plaatsgevonden, is wel snel gegaan, maar toch erg geleidelijk.

Ten einde zich de verschillen goed te realiseren, moet men de radartechnologie anno 1946 en anno 1971 met elkaar vergelijken. Men komt dan ongeveer tot de hiernavolgende opstelling (Tabel 1).

**Tabel 1.**

| 1946 | 1971 |
|---|---|
| a. *Radarfrequentiebanden* | |
| UHF (metergolven)<br>L-band ( 1,3 GHz; 23 cm)<br>S-band ( 3 GHz; 10 cm)<br>X-band (10 GHz; 3 cm) | Als 1946, aangevuld met:<br>C-band ( 5,5 GHz; 5,5 cm)<br>J-band (16 GHz; 1,9 cm)<br>Q-band (35 GHz; 9 mm) |
| b. *Transmissielijnen* | |
| Lecher-lijnen<br>Coaxiale lijnen<br>Golfpijpen | Als 1946, aangevuld met:<br>Micro-'strip'-lijnen |
| c. *Zendbuizen* | |
| Triodes<br>Magnetrons, vaste frequentie<br>Maximaal enkele honderden watt gemiddeld. | Vele varianten aan magnetrons, mechanisch of elektronisch afstembaar.<br>Mogelijkheid van zenderketens met behulp van versterkerbuizen (klystron, lopende-golfbuis, amplitron e.d.).<br>Tientallen kilowatt gemiddeld vermogen mogelijk. |
| d. *Ontvangerelementen* | |
| H.F.-versterking: geen<br>(Ruisfactor 10 à 15 dB) | Lopende-golfbuizen<br>Parametrische versterkers<br>Tunneldiode-versterkers<br>(Ruisfactoren 2 à 5 dB) |
| Hulposcillator:<br>triode of klystron. | Klystron of halfgeleider-oscillatoren. |
| MF- en videoversterkers met behulp van buizen. | Uitgebreide toepassing halfgeleiders. |

| 1946 | 1971 |
|---|---|
| Zend-ontvangschakelaars met behulp van met gas gevulde buizen; smalle frequentieband. | Zend-ontvangschakelaars, veelal breedbandig, met behulp van met gas gevulde elementen òf ferrietelementen. |
| e. *Zendsignaal, echoverwerking* | |
| Als zendsignaal-pulsen op vaste frequentie<br>Eenvoudige, lineair werkende ontvangers. | Vele mogelijkheden om zendsignaal aan toepassing aan te passen, bijv. door middel van pulscompressie.<br>Geavanceerde ontvangertechnieken, gericht op onderdrukking van ongewenste storende echosignalen (logaritmische ontvangers, dopplertechnieken e.d.). |
| f. *Informatieverwerking* | |
| Echopresentatie op beeldscherm<br>Na het beeldscherm werd verder verwerking van informatie geheel aan de mens overgelaten, zoals het detecteren en volgen van echo's, de interpretatie en reductie tot essentiële data als basis voor beslissingen. | Bij grote systemen een sterke neiging tot automatisering van voorheen menselijke functies, waarbij de digitale rekenmachine een grote rol speelt. |

| 1946 | 1971 |
|---|---|
| g. *Antennes* | |
| Rondzoekantennes t.b.v. detectie.<br>Aparte antennes voor volgen van objecten en voor hoogtemeting, veelal met de hand nagestuurd.<br>Steeds was bundelrichting bepaald door de oriëntatie van de antenne. | Grote variëteit in uitvoering, afhankelijk van toepassing, o.a. geïntegreerde antennes voor detectie, volgen, hoogtemeting met gebruik van verfijnde technieken (monopuls e.d.).<br>Vast opgestelde antennes met elektronische sturing van de bundelrichting zijn mogelijk. |
| h. *Berekeningsgrondslagen* | |
| Beperkt tot hoofdzaken<br>Gebruik van begrippen ontleend aan de radiotechniek (signaal-ruisverhouding e.d.)<br>In vele gevallen toepassing van, achteraf juist gebleken, intuïtie. | Verfijnde grondslagen ter berekening van diverse data.<br>Toepassing van begrippen uit de waarschijnlijkheidsleer (i.v.m. ruis), informatietheorie en beslissingskunde.<br>(Detectiekans, loos-alarmkans e.d.) |

Er is in het tijdvak 1946 ... 1971 dus zeker wel het een en ander gebeurd op dit gebied. De technische mogelijkheden zijn sterk vergroot en naar behoefte kan hiervan gebruik worden gemaakt.

Anno 1971 is de radartechniek niet meer 'iets bijzonders', doch een gevestigde techniek, óók in Nederland, en tot dit feit heeft prof. Von Weiler in belangrijke mate bijgedragen.

*

* *

621.396.969:681.32:527

# III. Toepassing van de computer in radarsystemen

**door ir. P. Stam,** N.V. Philips Electrologica, Apeldoorn



**Synopsis:** *Application of Computers in Electronic Navigation*

A survey is given of the principles of radar and computers and the particular aspects of systems in which these are combined.

Some examples in the field of tracking and search radar get attention. Also the computational functions in a 3-D-radar system are discussed.

## Inleiding

Computers hebben een oudere voorgeschiedenis dan radar, maar niettemin heeft radar in allerlei opzicht bij de conceptie van moderne computers een belangrijke rol gespeeld. Immers, hoewel reeds in 1642 door Pascal een mechanische optel- en aftrekmachine werd ontwikkeld en omstreeks 1840 Babbage zijn 'analytical engine' tevergeefs *aan de praat* probeerde te krijgen, moest tot 1946 gewacht worden vóór Von Neumann, Burke en Goldstine het idee van de computer met programma en data in één geheugen lanceerden, en pas echt van automatische gegevensverwerking gesproken kon worden; radar bestond toen al een aantal jaren.

Dat dit op computergebied mogelijk was geworden werd veroorzaakt door de stormachtige ontwikkeling van de elektronica in de Tweede Wereldoorlog; vooral de impulstechniek, ontwikkeld in het kader van radarsystemen, heeft de bouwstenen van de elektronische computer opgeleverd.

De mate van verwantheid in afkomst is zelfs nu nog te herkennen bij bepaalde technische realiseringen in computersystemen. Men vindt enerzijds de duidelijke invloed van de schakel-

De auteur was eerder werkzaam bij de N.V. Hollandse Signaalapparaten, Hengelo.

techniek, zoals deze beoefend werd in de relaistechniek; anderzijds zijn daar de typische tijdsafhankelijke circuits, welke in radarsystemen het eerste werden toegepast.

Maar genoeg over vermeende of werkelijke familierelaties tussen computers en radar; we willen in het volgende wat nader ingaan op het samengaan van beide ontwikkelingen.

Ik wil de lezer niet vermoeien met in te gaan op alle 'toeters en bellen' die in de loop der jaren aan het basisprincipe van radar zijn toegevoegd. De in dit artikel aangegeven verdeling van radarsystemen wordt gecompliceerd door mengvormen waarin zowel 'zoeken' als 'volgen' in één systeem zijn ondergebracht.

### Radar

Radar wordt gebruikt voor het vaststellen van de plaats en beweging van objecten in de atmosfeer (en daar buiten). Het principe berust op het verschijnsel dat elektromagnetische golven gebundeld uitgezonden kunnen worden en, na reflectie aan objecten, zich in een ontvanginrichting laten detecteren.

De voornaamste bestanddelen van een radarsysteem zijn in fig. 1 aangegeven voor het geval dat één antenne voor zowel zenden als ontvangen gebruikt wordt. Wordt het radarsysteem gebruikt voor het waarnemen van de gehele of gedeeltelijke omgeving, dan spreekt men van een *zoekradar*. Wanneer het radarsysteem gebruikt wordt om van een object nauwkeurig de plaats èn de beweging vast te stellen, spreekt men van een *volgradar*.

Hoewel het mogelijk is om, o.a. door gebruik te maken van het doppler-effect, ook met een zoekradar de beweging van een object vast te stellen, is voor een nauwkeurige en continue bepaling, zoals bijv. noodzakelijk in de ruimtevaart, een hoge herhalingsfrequentie van de metingen nodig en gebruikt men *per object* een speciale volgantenne. Een dergelijke antenne is in elevatie en breedtehoek bestuurbaar en kan, door het meten van de afwijking van het object ten opzichte van de as van de bundel, automatisch op het object gericht blijven indien de gemeten afwijkingen gebruikt worden om de antennestand te corrigeren.

Aangezien het voor het object mogelijk is om vast te stellen of het door een radarbundel aangestraald wordt, kan het deze informatie gebruiken om:

a. de gereflecteerde energie te versterken, door bij aanstraling een versterkte impuls uit te zenden, al of niet voorzien van aanvullende informatie betreffende identiteit e.d.;
b. de gereflecteerde energie te verzwakken of te verstoren;
c. de eigen positie ten opzichte van de radarbundel vast te stellen en, op grond hiervan, de eigen plaats en richting te corrigeren.

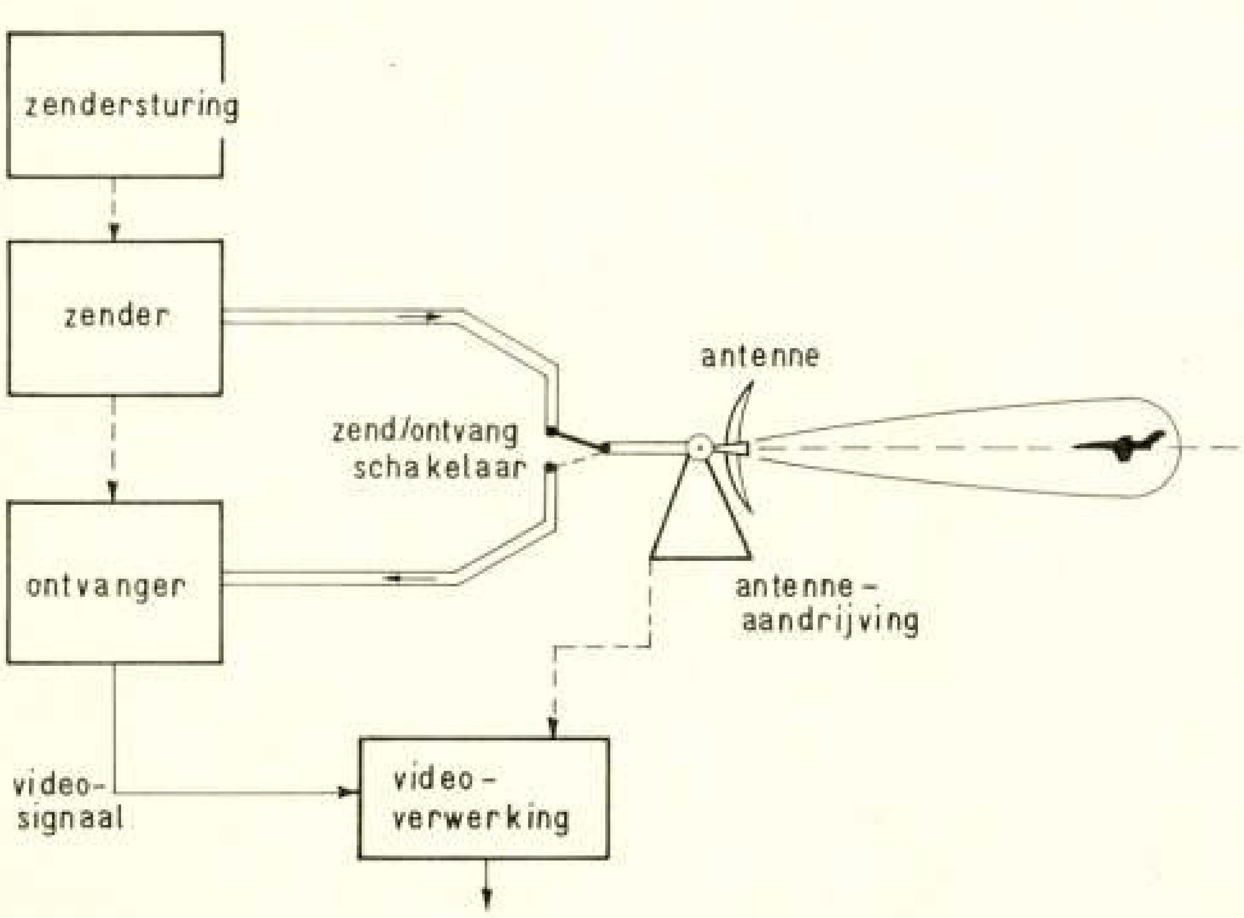



Fig. 1. Radarsysteem.

### Computers

We worden zo langzamerhand overspoeld met (meer of minder) populair-wetenschappelijke beschouwingen over de computer, zijn werkwijze, toepassingen, mogelijkheden en gevaren. Opvallend is, dat dergelijke 'verhalen' zich alle concentreren op die vormen, waarbij de computer in feite als werktuig voor de mens fungeert en de administratieve en rekenkundige problemen van zijn schouders afneemt (in ruil voor andere zorgen).

De *andere* computer is die, waarbij deze de functie van besturingselement vervult in een proces. Of dit proces nu het vervaardigen van papier, het volgen van een ruimtevaartuig of het besturen van luchtverkeer is, blijft buiten beschouwing.

De overeenkomst zit natuurlijk in het feit dat ook een administratieve handeling, zoals het verzorgen van de voorraadadministratie, als een proces te beschouwen is; we spreken daarbij dan ook niet voor niets van procedures. Het onderscheid ligt in de factor *tijd*, die bij procescomputers van overheersende betekenis is en een directe koppeling tussen proces en computer noodzakelijk maakt, met uitschakeling van menselijke tussenkomst. Een tweede verschil ligt in het feit dat de administratief/wetenschappelijke computer veelal een grote verscheidenheid van problemen door zijn gebruikers krijgt opgedragen; de procescomputer daarentegen heeft meestal slechts één taak, welke zeer gecompliceerd kan zijn, maar zich verhoudingsgewijs slechts zelden wijzigt. In dit verband wordt dan ook wel een van de overigens wat ongelukkige bijvoeglijke aanduidingen 'specialpurpose' resp. 'dedicated' computer gebruikt.

Wanneer een dergelijke computer in een gesloten systeem is opgenomen ontstaat een regelsysteem, waarin de computer de binnenkomende (meet-)gegevens omzet in besturingscommando's voor het proces (fig. 2). Een dergelijke situatie zullen wij bij computers in radarsystemen voor een aantal gevallen nader toelichten.

Van veel belang is in dit soort computers, dat de in- en uit-

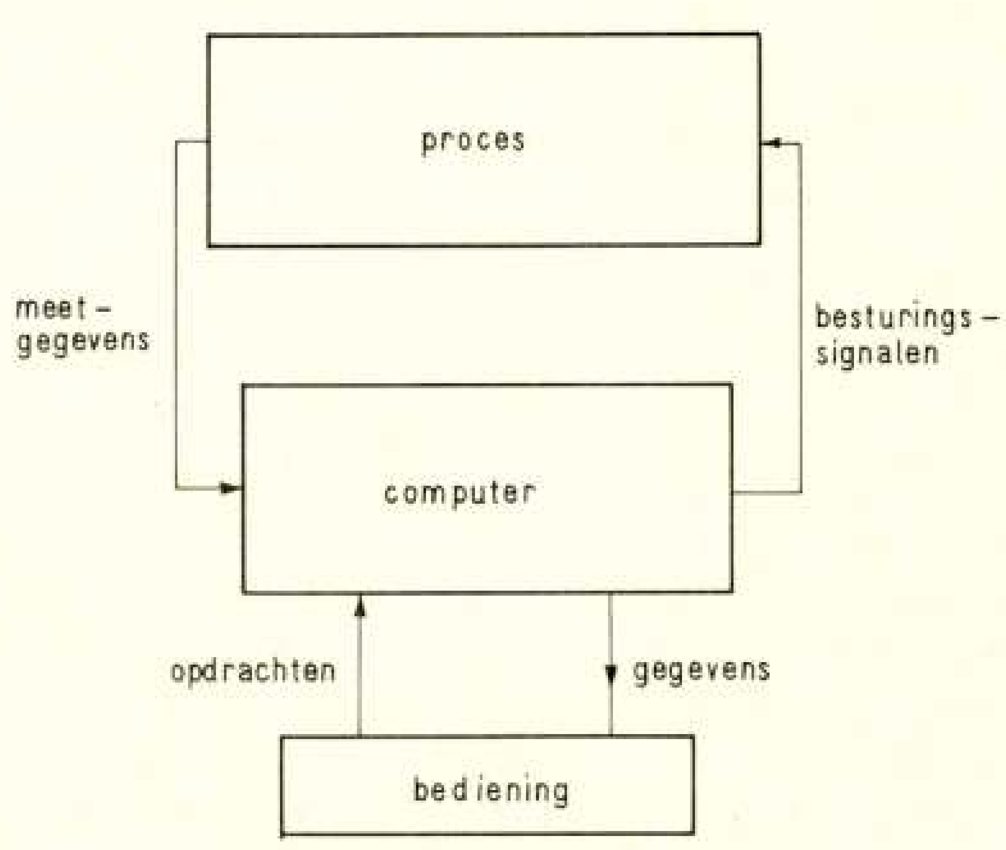



Fig. 2. Computer, gekoppeld aan proces.

gaande transporten snel verlopen èn dat direct gereageerd wordt op inkomende gegevens. Daartoe is meestal een apart, autonoom werkend input/output-orgaan aanwezig plus een organisatie om op zgn. *interrupt-signalen* te reageren. Het laatste houdt in, dat een lopend programma onderbroken kan worden bij een dergelijk signaal, indien de prioriteit hiervan voldoende hoog is. In dit geval wordt overgegaan op het programma, dat behoort bij deze interrupt en pas na afwerking daarvan wordt het onderbroken programma weer ter hand genomen, indien er inmiddels niet een volgend interrupt signaal van voldoend hoge prioriteit binnengekomen is.

Het is duidelijk dat een dergelijke flexibiliteit in het wisselen van programma's vraagt om een besturingsprogramma van hoge kwaliteit. Een streng doorgevoerde systematiek in het aanroepen en afwerken van programma's en in het beheer van de bijbehorende data is de eis aan de ene kant. Hier staat tegenover het verlangen om de 'overhead' in programmatuur veroorzaakt door een dergelijk gecompliceerd besturingsprogramma te minimaliseren. De praktijk leert, dat eenvoud en doorzichtigheid in de opzet van deze 'software' uiteindelijk meer waard zijn dan een te ver doorgevoerde slimheid, die voortkomt uit het verlangen naar een zuinig gebruik van tijd en geheugen in de computer.

De uitgaande data zijn meestal bestemd om via de digitaal/analoog-omzetter aan het proces toegevoerd te worden. Evenzo zijn de binnenkomende meetgegevens veelal van analoge aard, en moeten dus, voor ze aan de computer toegevoegd kunnen worden omgezet worden van analoog naar digitaal (A/D conversie).

Voor deze analoog-naar-digitaal omzetting zijn er drie grondprincipes:

a. meten door tellen (bijv. tijd);
b. meten door vergelijken (bijv. elektrische spanning);
c. directe codering (bijv. hoeken).

Zonder op de uitvoeringsvormen in te gaan is het duidelijk, dat men vele, zo niet alle metingen tot deze principes kan terugvoeren. De reden, dat vaak eerst een grootheid op analoge wijze in een spanning wordt omgezet om pas daarna digitaal gecodeerd te worden, is meestal van praktische aard. Het reeds bestaan van een dergelijke analoge uitvoering, standaardisatievoorschriften, gebrek aan aders in een kabel of kostprijsoverwegingen e.d. geven daartoe aanleiding. De mogelijkheid om de omzettingen in één centrale eenheid te voeren, waarin de signalen na elkaar omgezet worden, leidt tot een economische en flexibele oplossing.

Fig. 3 geeft een beeld van een dergelijke computerinstallatie, mèt daarbij samengebouwd de analoog/digitaal-conversieapparatuur.

## Computerfuncties in radarsystemen

Omstreeks 1955 werd zowel bij het LEOK als bij het Physisch Laboratorium RVO/TNO gewerkt aan de verwerking van radargegevens met behulp van digitale computers. Eén van de steeds weer opduikende vragen was: 'Waarom een digitale computer voor het verwerken van in wezen analoge gegevens?' Immers, in een radarsysteem worden *afstanden* uitgedrukt d.m.v. de *tijd*-intervallen, die liggen tussen het uitzenden van de zendimpuls en de ontvangst van het gereflecteerde signaal in de ontvanger. De *richting* van het object volgt uit de stand van de bundel in de ruimte, meestal gemeten in breedtehoek en elevatiehoek met behulp van synchro's, resolvers of soortgelijke elektrische hoekmeetinstrumenten.

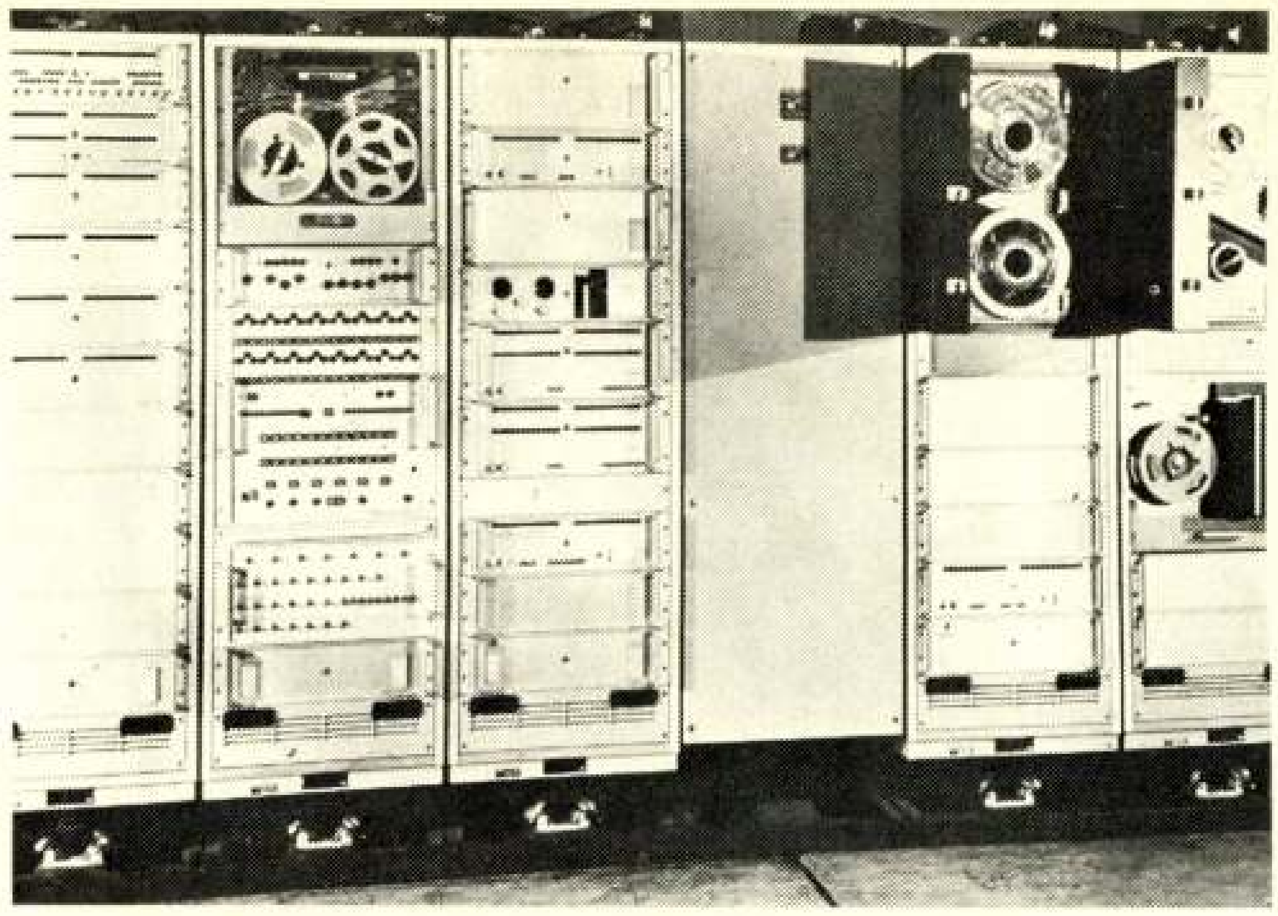


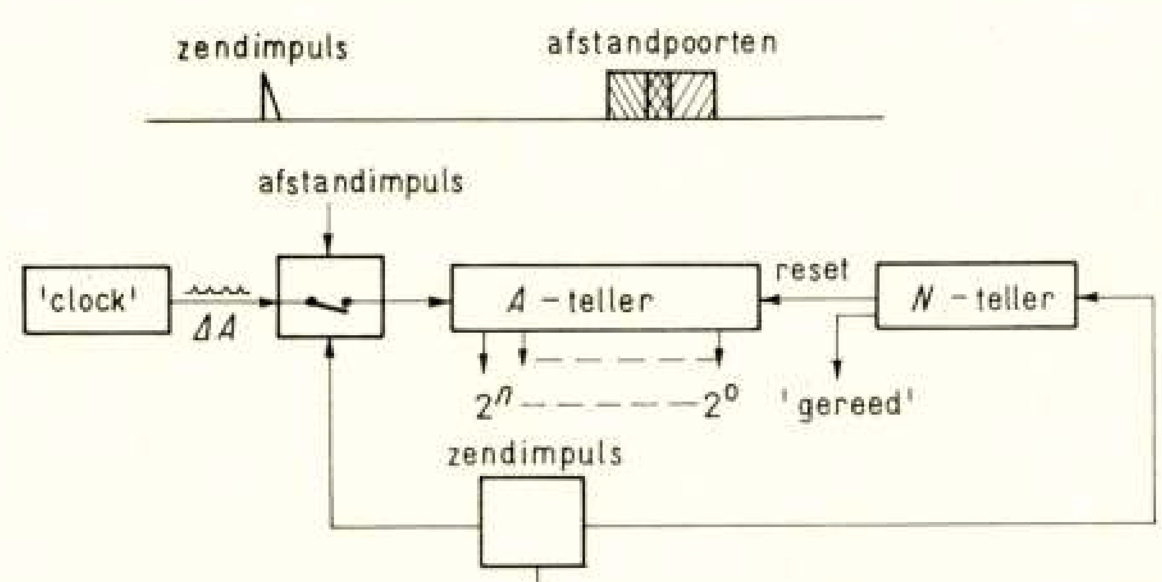
Fig. 3. Computerinstallatie met analoog/digitaal-conversie-apparatuur.

Om deze gegevens voor een digitale computer geschikt te maken dient een omzetting plaats te vinden van een analoge naar een digitale presentatie, wat op het eerste gezicht een extra mogelijkheid voor onnauwkeurigheid en extra materiaal betekent. Er zijn gelukkig voor deze problemen doelmatige oplossingen gevonden, waardoor zelfs het schijnbare nadeel van de extra omzetting in een voordeel, nl. verhoogde meetnauwkeurigheid, veranderd wordt.

## Volgradar

Ik wil het voorgaande toelichten aan de hand van de beschrijving van een digitale computer in een volgradar-systeem.

We beschouwen allereerst de *afstandsfunctie*, m.a.w. de meting van de afstand van de antenne tot het te volgen object. Hierbij is het gewenst, uitsluitend die reflectiesignalen te verwerken welke inderdaad van het te volgen object afkomstig zijn (fig. 4).




$$\bar{A} = \frac{1}{N} \sum_N A_i \ ; \ N = 2^p$$

$$\sigma_{\bar{A}} = \frac{\Delta A}{6\sqrt{N}}$$

Fig. 4. Afstandsmetingen en analoog/digitaal-conversie bij volgradar.
$A$ = afstand
$N$ = aantal zendimpulsen
$p$ = geheel getal
$\sigma$ = standaarddeviatie (spreiding) van de uitkomst
$\bar{A}$ = resultaat ná middeling over $N$ metingen

Daartoe is in de ontvanger een poortschakeling aangebracht, die zó werkt dat de ontvanger slechts geopend wordt wanneer er signalen van de afstand, behorend bij het te volgen object, binnenkomen.

In feite is deze poortschakeling op zichzelf weer een servosysteem, aangezien er twee poorten vlak na elkaar geopend worden, waarbij deze tijdstippen zodanig door de computer geregeld worden, dat het geïntegreerde signaal in beide poorten gelijk is.

De digitale afstandsmeting vindt plaats door gedurende het tijdsinterval tussen uitzenden en ontvangst een stroom van klokpulsen toe te laten aan een zeer snelle teller. De stabiliteit en frequentie van deze klokpulsen bepalen de nauwkeurigheid en fijnheid van de afstandsmeting. Aangezien de herhalingsfrequentie van de radarzendimpulsen het toelaat om een aantal metingen samen te voegen, kan hierdoor het resultaat van de meting verbeterd worden, zodat de resolutie van de naar de computer overgebrachte waarde van de afstand beter is dan die van de klokpulsen zelf. Deze methode van afstandsmeting door tellen leidt tot nauwkeuriger resultaten dan met analoge middelen mogelijk is.

Voor de *hoekmeting* is het niet alleen nodig om de stand van de antenne-assen over te brengen naar de computer, maar bovendien om de antenne op het doel gericht te houden. Hiertoe wordt de radarbundel zowel in elevatie als breedtehoekrichting in tweeën gesplitst (fig. 5); het verschilsignaal voor de beide richtingen wordt bepaald en aan de computer toegevoerd.

De antenne wordt nu zodanig bestuurd, dat deze verschilsignalen minimaal worden. De grootte van het verschil wordt gevonden door de, reeds in afstand geselecteerde, signalen van elkaar af te trekken, waarna dan nog variaties in de sterkte van het gereflecteerde signaal worden gecompenseerd door middel van delen door het somsignaal.

Wij beschikken nu over de positie van het object in polaire coördinaten ($A$, $B$ en $E$), mèt de daarbij behorende gemeten 'fouten' ($fA$, $fB$ en $fE$). Het hierna volgende rekenproces om uit deze polaire coördinaten de positie en snelheid in rechthoekige coördinaten te verkrijgen is in fig. 6 aangegeven. Een belangrijk onderdeel is hierbij het numerieke filterproces om fluctuaties door ruis in de meetgegevens zoveel mogelijk te onderdrukken.

Dit filterproces mag evenwel niet zo traag zijn, dat bij eventuele afwijkingen van de rechtlijnig-eenparige beweging het object uit de bundel zou geraken. Daarom wordt een berekeningswijze gevolgd, waarbij de 'filterconstanten' $\alpha$ en $\beta$ aangepast worden aan de heersende situatie. Variatie tussen de waarden 0 en 1 voert van een zeer traag, sterk afvlakkend tot een zeer snel reagerend maar nauwelijks filtrerend rekenproces.

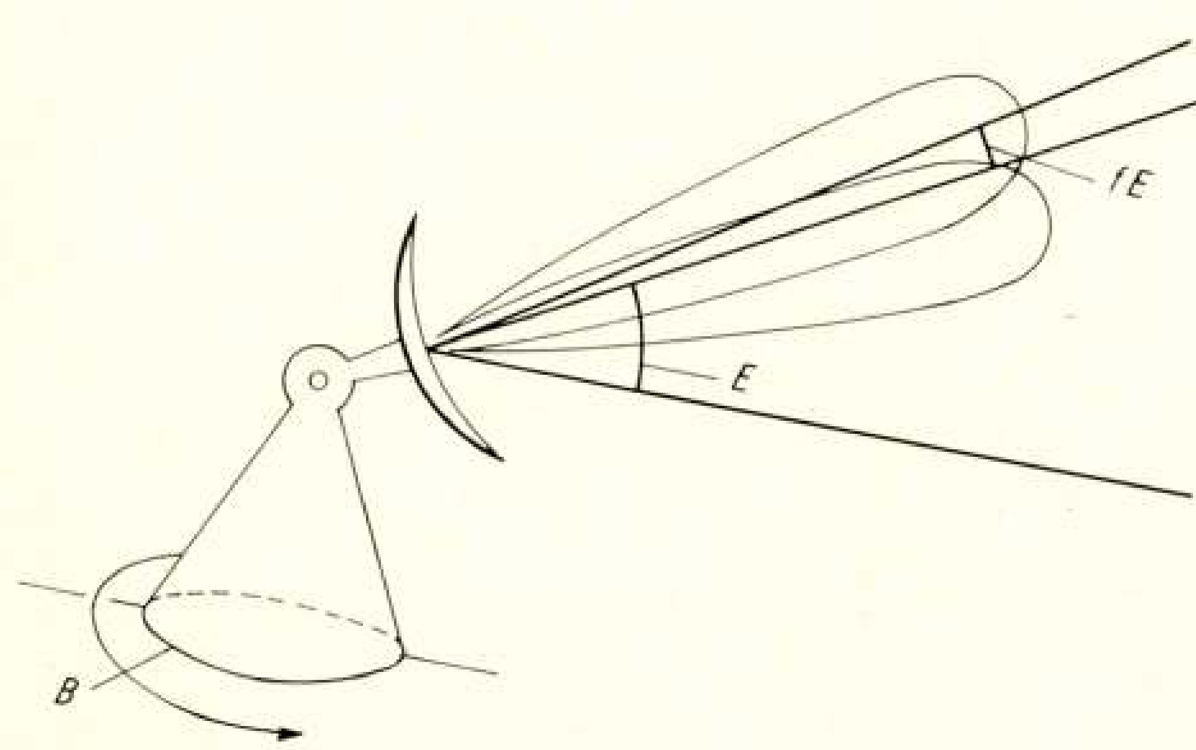



Fig. 5. Principe van hoekmeting in volgradar.

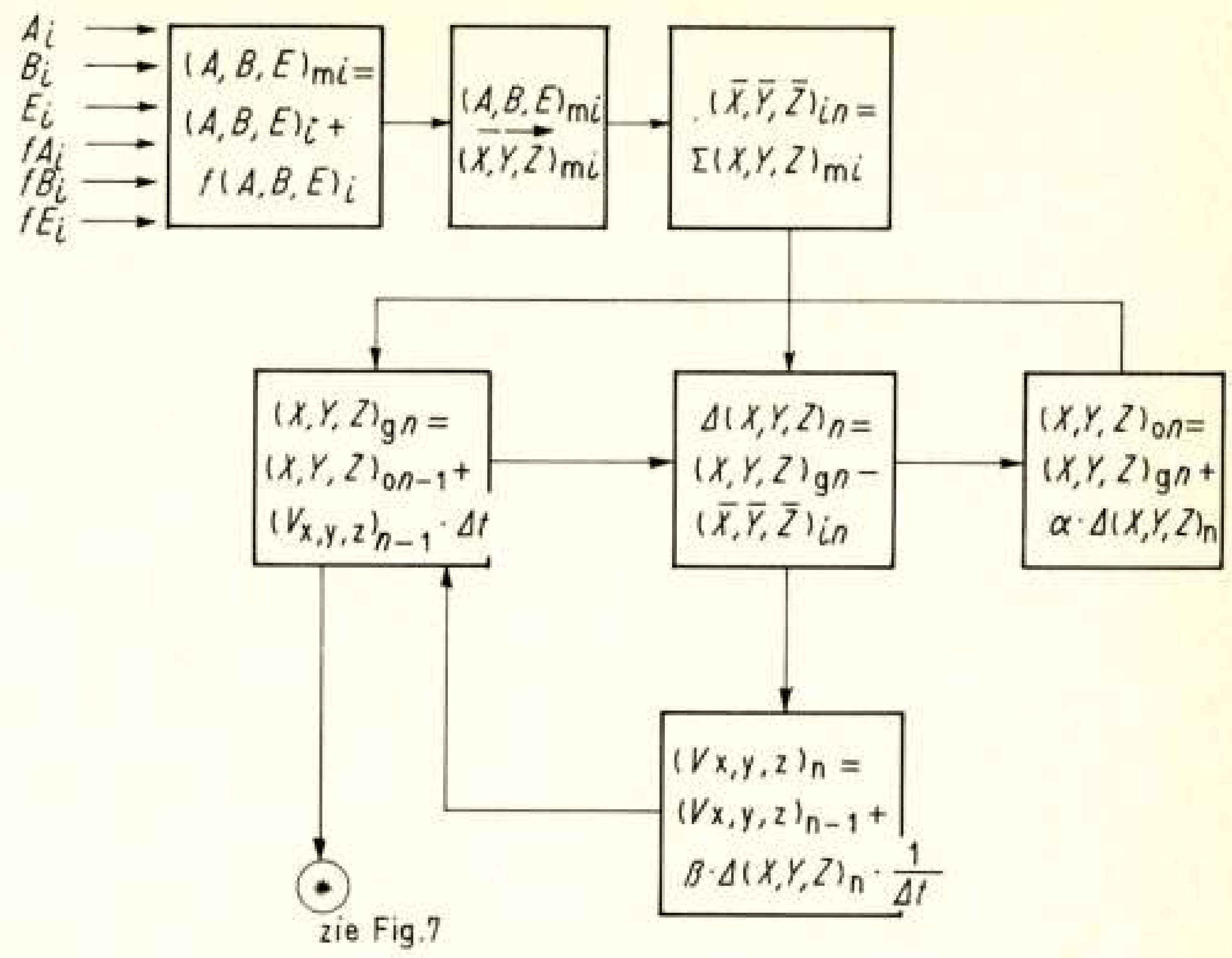



**Fig. 6.** Rekenschema voor de bepaling van positie en snelheid.
$\Delta t$ = tijdsinterval tussen de berekeningen
m,$i$ = index, aangevende een gemeten vector met volgnummer $i$, op grond van gemeten afstand, antennestand en afwijkingen daarin
i,$n$ = index, aangevende een berekende vector met volgnummer $n$, op grond van een aantal gemeten posities
o,$n$ = index, aangevende een 'gefiltreerde' vector met volgnummer $n$
g,$n$ = index, aangevende een gegenereerde (of voorspelde) waarde van een vector met volgnummer $n$

In fig. 7 is aangegeven, hoe tenslotte de stuurwaarden $\Delta A$, $\Delta B$ en $\Delta E$ berekend worden, welke aan de antenne worden toegevoerd om deze op het doel gericht te houden.

Hoewel de hier geschetste gang van zaken lang niet alle details weergeeft, die in werkelijkheid bij dit rekenproces aan de orde komen, kunnen we reeds enkele belangrijke mogelijkheden van de digitale computer voor radarvolgsystemen aangeven:

1. De mogelijkheid om meetgegevens naar elk gewenst assenstelsel te converteren.
2. Het uitvoeren van een optimaal filterproces (met flexibele aanpassingsmogelijkheden van de filterconstanten), voor het berekenen van positie en snelheid.
3. Het 'vasthouden' van het object, zelfs als de meetinformatie tijdelijk uitvalt, door generatie van de antennebeweging uit de laatstgevonden positie en snelheid.
4. Het zonder tijdsvertraging invoeren van nieuwe coördinaten, indien de antenne op het volgen van een ander object moet overgaan.

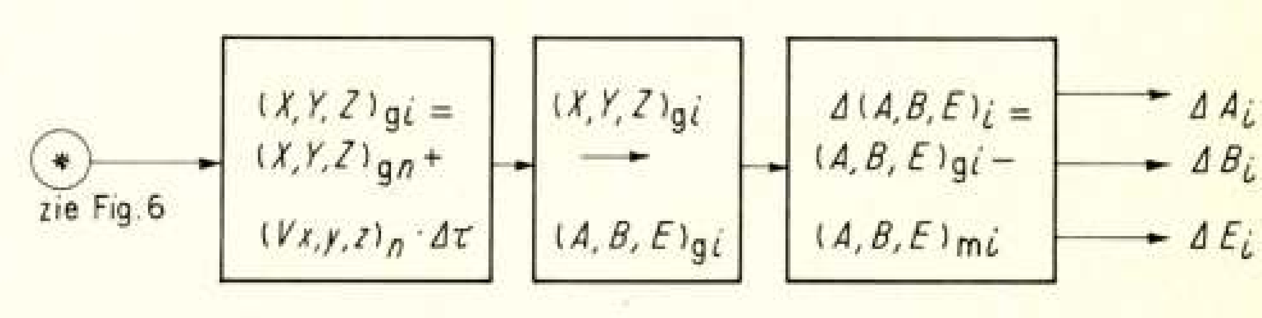



**Fig. 7.** Berekening van hoekstuurwaarden voor volgantenne.
$gi$ = index, aangevende een geïnterpoleerde waarde van een gegenereerde vector
$\Delta\tau$ = interpolatie-interval in het interval $\Delta t$

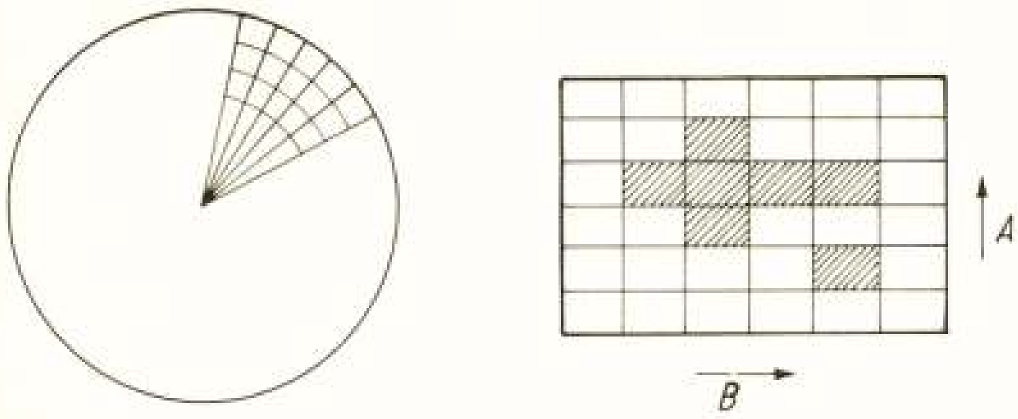



**Fig. 8.** 'Patroon' bij zoekradar.

5. Uitvoering van al deze en andere berekeningen zonder verlies aan wezenlijke nauwkeurigheid en tijd.
6. Combinatie van gegevens door uit deze radarinformatie verkregen uitkomsten samen te voegen met op andere wijze (bijv. optisch) verzamelde informatie.

**Zoekradar**

De computer kan bij de verwerking van de informatie, verkregen met behulp van een zoekradar, eveneens uitstekende diensten verrichten. Zo is het mogelijk om een aantal objecten gelijktijdig te volgen en daarvan de positie en bewegingsgegevens te berekenen.

In fig. 8 is aangegeven, hoe in een klein gebied van de totale rondzoekomvang de verkregen reflectiesignalen aanleiding geven tot een patroon van wel of niet aanwezige signalen. Het computerprogramma heeft onder meer tot taak, uit dit patroon af te leiden:

a. of er sprake is van een (bewegend) object;
b. zo ja, wat de beste schatting voor de positie daarvan is;
c. uit opeenvolgende, bij elke omwenteling verkregen patronen de beste schatting van de positie en bewegingscoördinaten van het object vast te stellen.

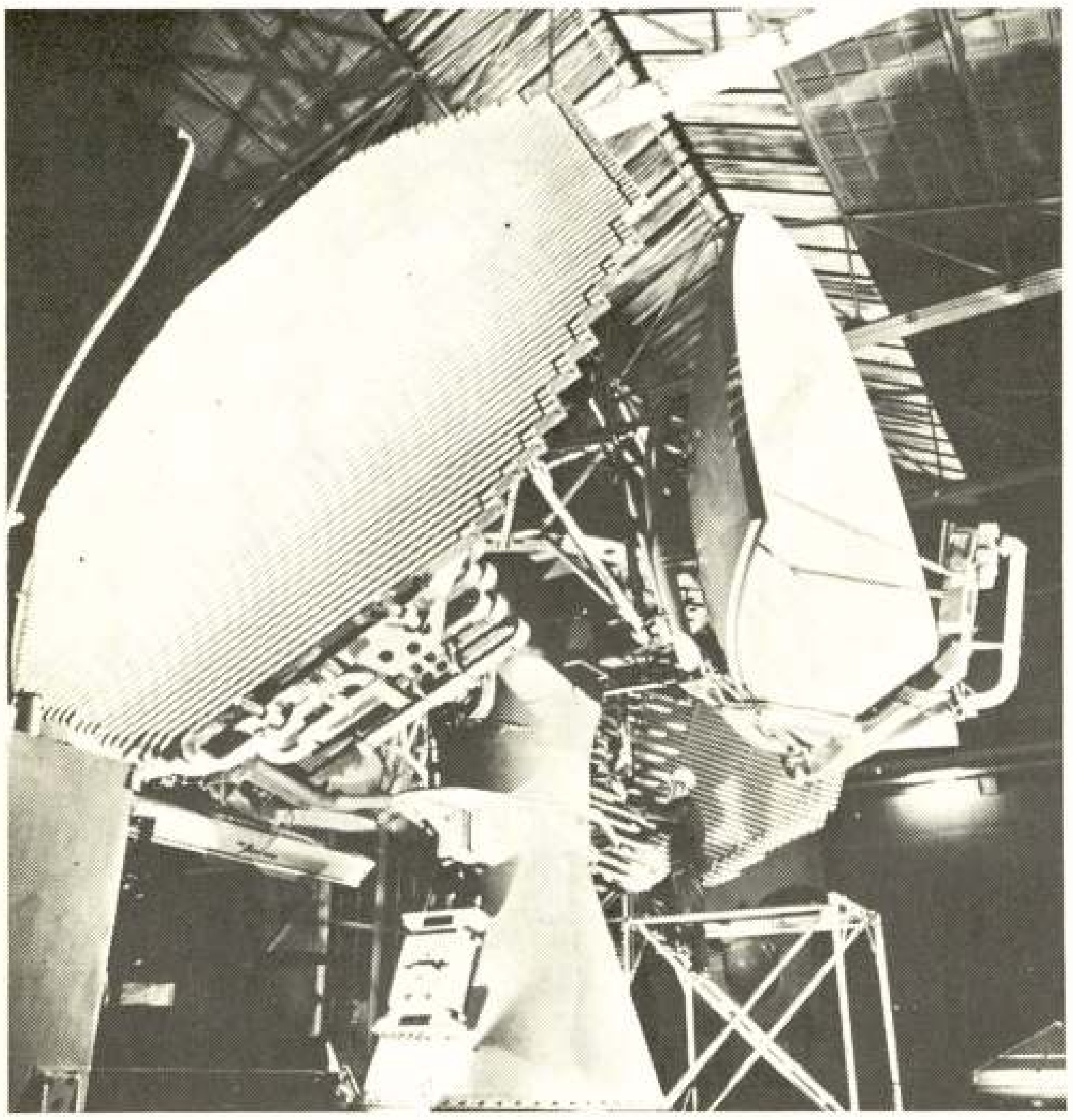


**Fig. 9.** 3-D-antenne.

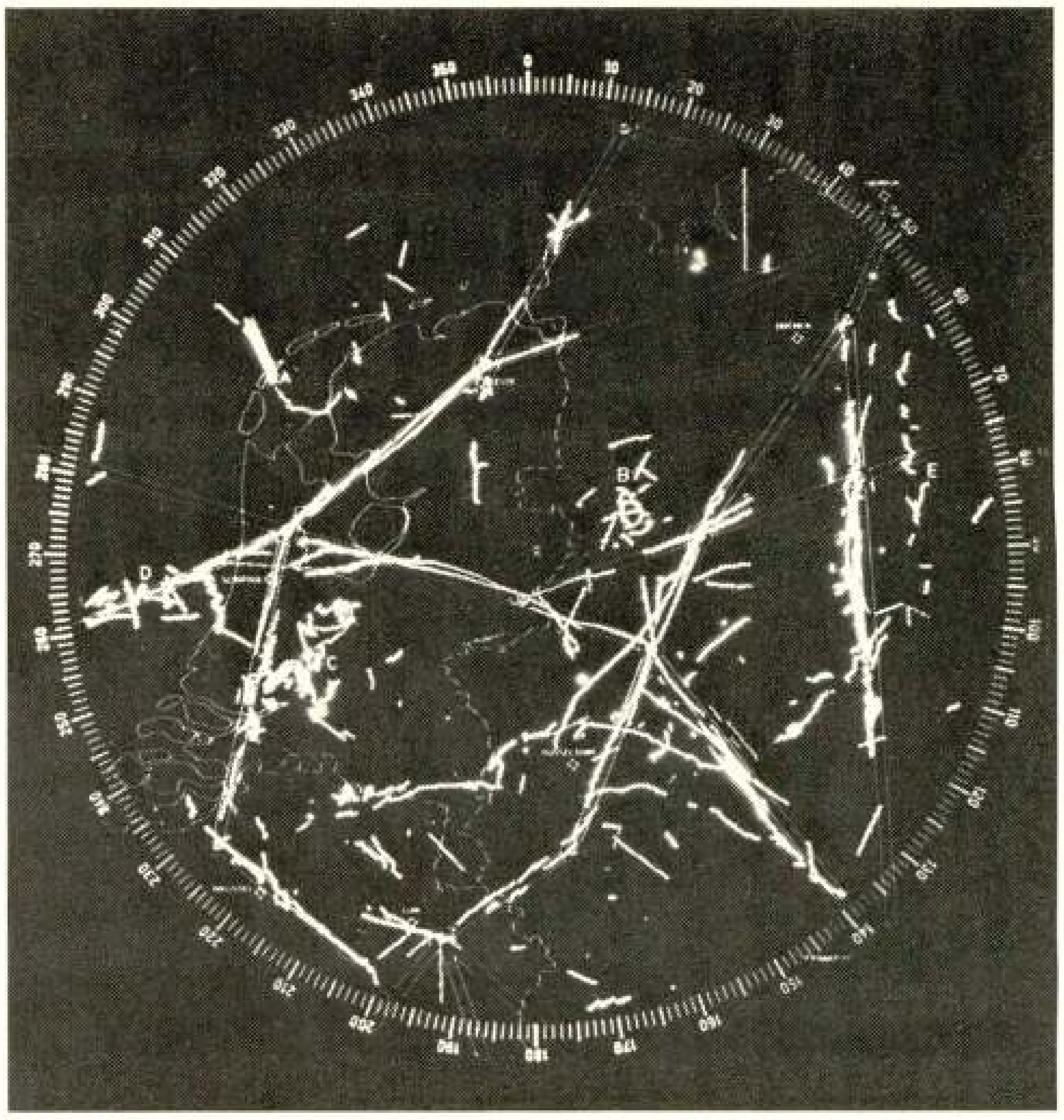


**Fig. 10.** Tijdopname van beeldscherm, gekoppeld aan computer van 3-D-radarsysteem.

Dat hier sprake is van een real-time probleem in optima forma behoeft nauwelijks betoog: elk signaal, dat de ontvanger afgeeft moet in principe direct verwerkt worden, althans aan het arsenaal van patronen worden toegevoegd en daarmee worden gecombineerd.



**Fig. 11.** Luchtverkeersregelcentrum 'Schiphol'.

### 3-D-radar

De gedachte ligt voor de hand om de functie van zoek- en volgradar in één systeem te combineren. In feite komt dit er op neer, één of meer radarbundels zodanig te richten, dat nieuwe objecten zo snel mogelijk gedetecteerd, en reeds bekende objecten zo nauwkeurig mogelijk gemeten worden.

Dit 'richten' van de radarbundel kan vrijwel tijdloos gebeuren door gebruik te maken van een combinatie van sleufstralers als antenne. De richting van de hoofdbundel wordt bij een dergelijke antenne bepaald door de geometrie van de stralers en de frequentie van de uitgezonden golfenergie, waarbij de bekende sinuswet geldt voor het verband tussen richting, frequentie en periode van de stralers. De computer heeft nu o.a. tot taak, voor *elke* uit te zenden impuls de gewenste richting (en dus frequentie) te berekenen en deze aan de zender op te geven. Aangezien duizenden impulsen per seconde uitgezonden kunnen worden is het duidelijk, dat voor deze taak reeds een aanzienlijke rekencapaciteit gevraagd wordt.

De belangrijkste functie is evenwel, de *ontvangen signalen* te verwerken, de feitelijke informatie te 'filtreren' uit alle echte en onechte signalen, en hieruit weer af te leiden hoe de strategie voor het besturen van de zender aangepast moet worden. Het is vrijwel ondenkbaar, dat een dergelijk systeem op andere wijze dan met een zeer snelle digitale computer te verwezenlijken zou zijn.

Fig. 9 geeft een indruk van de afmetingen van een antennesysteem als vorenbedoeld; behalve de sleufstralers zijn ook nog 'normale' antennes aangebracht, welke elk verscheidene bundels in verticale zin kunnen uitstralen.

Fig. 10 toont een tijdopname van een beeldscherm, waarop de door de computer berekende posities van een groot aantal bewegende objecten boven Nederlands grondgebied (in omtrek op het scherm te zien) en daarbuiten werden weergegeven. Eén van de belangrijkste problemen bij een dergelijk groot aantal 'tracks' is het ononderbroken blijven volgen van alle objecten, ook wanneer er sprake is van banen die vlak bij elkaar liggen, elkaar kruisen, of gaan door gebieden met veel storende reflecties.

In fig. 11 is tenslotte het luchtverkeers-regelcentrum ('air-traffic control centre') van Luchthaven Schiphol afgebeeld waar op uitgebreide schaal gebruik wordt gemaakt van radarinformatie en computers voor het controleren en besturen van het luchtverkeer boven Nederland. Het is nu reeds vrijwel ondenkbaar dat zonder deze combinatie de bestaande verkeersintensiteit te beheersen zou zijn, laat staan de in de toekomst nog te verwachten toeneming van het luchtverkeer effectief in veilige banen geleid zou kunnen worden.

### Besluit

Getracht is, aan de hand van enkele voorbeelden van computerfuncties in een radarsysteem, een indruk te geven van de mogelijkheden die het combineren van de ontwikkelingen op de gebieden van radar en computers heeft opgeleverd. De eigenschap dat met een geprogrammeerde computer vrijwel elk gewenst mathematisch model kan worden gerealiseerd, is de grondslag voor het succes van deze combinatie; alleen rekensnelheid en geheugenomvang vormen de beperkingen.

Wanneer we ons realiseren, dat zowel de rekensnelheid als de geheugengrootte in de laatste 10 jaar met bijna een factor 100 zijn toegenomen, is het duidelijk dat het einde nog niet in zicht is. Vooral het terrein van de directe signaalverwerking biedt nog vele mogelijkheden voor computertoepassingen. Evenzo zijn verkeersregelingssystemen denkbaar, waarin gegevens afgeleid uit radarmetingen gecombineerd worden met die welke met behulp van data-overdracht verkregen worden. In deze systemen worden per object niet alleen gegevens betreffende de gemeten positie verwerkt, maar ook aanvullende gegevens zoals identitiet, bestemming e.d.

*

* *

621.396:527

# IV. Moderne radio-navigatiesystemen

**door ir. C. Los,** wetenschappelijk medewerker Afdeling der Elektrotechniek, T.H. Delft



**Synopsis:** *Modern Radio-Navigation Systems*
In the first part of the present paper the world-wide modern systems OMEGA and TRANSIT (developed and become operational 1960 ... 1970) are dealt with. In the remaining part, the concepts underlying the proposed American NAVSTAR system are outlined and discussed.

### Inleiding

Door de snel toenemende verkeersdichtheid op en boven de oceanen is er behoefte ontstaan aan nauwkeurige, wereldomvattende navigatiesystemen. In de jaren 1960 ... 1970 zijn naast de bestaande optische en traagheids-navigatiemiddelen elektronische navigatiesystemen ontwikkeld en operationeel geworden. De ervaring opgedaan met radar en lokale elektronische navi-

gatie is onmisbaar geweest bij de ontwikkeling van de wereldomvattende systemen. We zullen hier echter aan voorbijgaan en aandacht schenken aan het VLF OMEGA systeem en het US Navy Navigation Satellite System TRANSIT. Deze systemen zijn operationeel – hoewel nog niet geoptimaliseerd – en genieten de volle belangstelling.

In vogelvlucht zal tevens worden ingegaan op de ontwikkeling van de gedachten die geleid hebben tot het opzetten van het NAVSTAR systeem.

Men kan als criteria voor de kwaliteit van een navigatiesysteem aanvoeren:

a. continue 'tracking', waardoor men op elk tijdstip de plaats weet waar men zich bevindt;
b. de tijd, benodigd voor het bepalen van de plaats: voor snelle vliegtuigen wordt een tijd in de orde van 0,1 s geëist;
c. geen beperking in aantal gebruikers;
d. geringe storingsgevoeligheid;
e. nauwkeurigheid;
f. de kosten.

De eis dat het systeem voor een onbeperkt aantal gebruikers tegelijk moet kunnen dienen, tezamen met de eis dat ononderbroken tracking mogelijk moet zijn, maakt het noodzakelijk dat de gebruikers alleen *luisteren* naar de uitzendingen en alle metingen en berekeningen zelf uitvoeren: een zgn. passief systeem. De storingsgevoeligheid en de nauwkeurigheid zijn sterk afhankelijk van de frequentiekeuze, terwijl ook de invloed van de kostenfactor op de storingsgevoeligheid en de nauwkeurigheid zeker niet verwaarloosd mag worden. Dat civiele toepassingen van de moderne systemen in feite mogelijk zijn geworden is voor het overgrote deel te danken aan de research en de investeringen van Defensie.

## Het OMEGA systeem

### *Hyperbolische systemen*

Als we in punt P (fig. 1) het faseverschil nemen van de elektromagnetische golven, uitgezonden door de zenders A en B, is dit verschil een maat voor het lengteverschil tussen de voerstralen AP en BP. De meetkundige plaats van punten met een constant fase- (= voerstralen) verschil is, zoals de wiskunde leert, een hyperbool. De afstand tussen twee opvolgende 0°-hyperbolen noemt men een 'lane'. Deze afstand is het kleinst op de basislijn en bedraagt daar $\lambda/2$, waarbij $\lambda$ de golflengte van de gezonden frequentie is.

Als we weten in welke lane we ons bevinden en we bepalen volgens dezelfde procedure een tweede hyperbool met behulp van een derde station, dan is onze plaats binnen de overlapping van 2 lanes bekend. Het OMEGA systeem is zo'n hyperbolisch systeem.

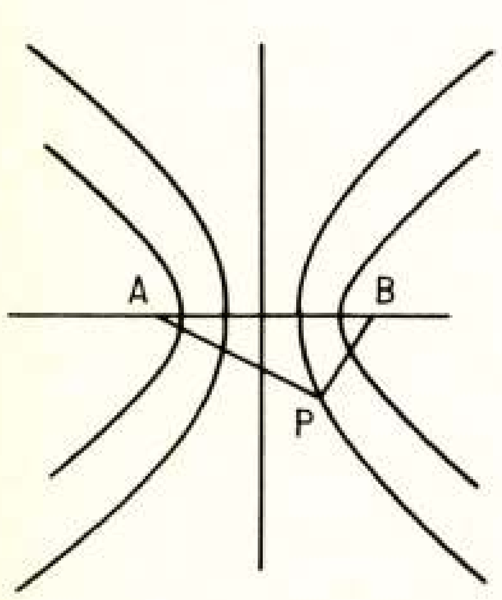



**Fig. 1.** Hyperbolisch systeem van punten met constant faseverschil t.o.v. de zenders A en B.

### *Het zendpatroon*

De VLF golven die in dit systeem gebruikt worden kunnen tot op zeer grote afstand van de zender worden ontvangen. Hierdoor is het mogelijk een wereldomvattend systeem te bouwen met acht zenders. In 1970 heeft de Amerikaanse regering het besluit genomen de 8 geplande zendstations te bouwen. Tot nu toe waren slechts 4 stations, te weten Aldra (Noorwegen), Trinidad, Haiku (eiland Maui, Hawaii-groep) en Forestport (Staat New York), beschikbaar voor experimenten.

OMEGA maakt gebruik van een frequentie-tijd multiplex zendpatroon (fig. 2 en 3). Gedurende ca. 1 seconde zendt station A op de frequentie 10,2 kHz, dan ca. 1 seconde op 13,6 kHz, daarna ca. 1 seconde op $11\frac{1}{3}$ kHz en de overige tijd van de 10-seconden cyclus op een 'unieke' frequentie.

De stations B ... H hebben hetzelfde patroon, elk echter ruim 1 s in tijd verschoven t.o.v. het vorige; ten overvloede zij gesteld, dat ieder station zijn eigen 'unieke' frequentie heeft.

Het is mogelijk om een ontvanger automatisch het zendpa-

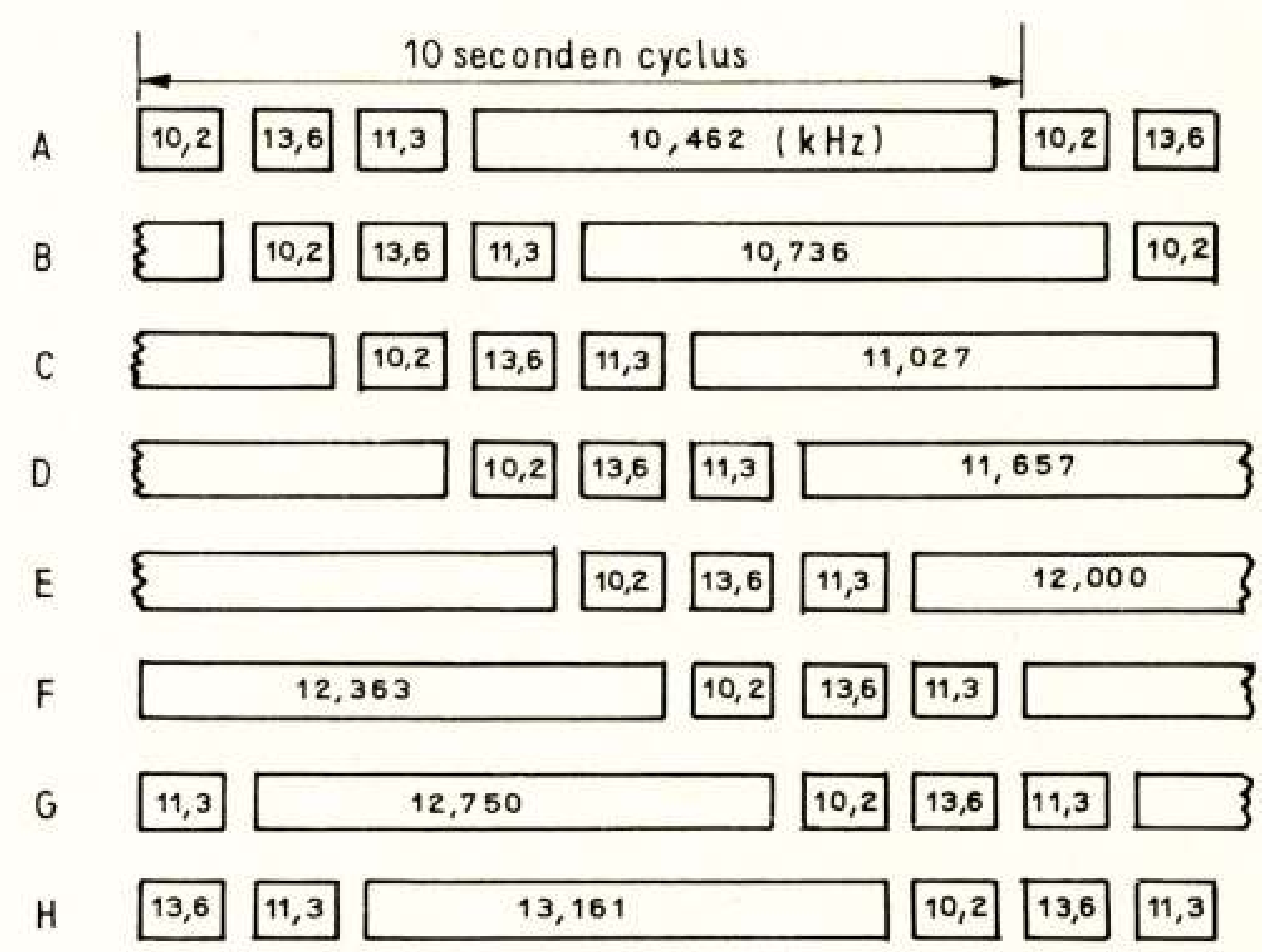



**Fig. 2.** Frequentie-tijd multiplex schema van het navigatiesysteem OMEGA.

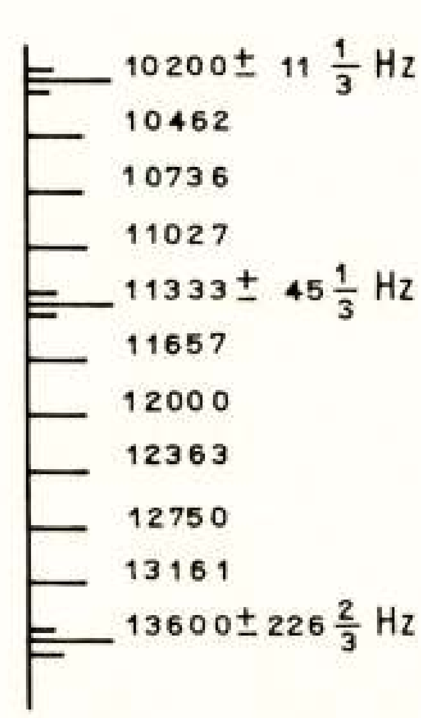



**Fig. 3.** Overzicht der in het OMEGA systeem gebruikte frequenties.

troon te laten herkennen, waarbij te gebruiken kenmerken zijn:
a. de lengtecodering van de uitzendingen;
b. de 'unieke' frequenties.

*Navigatie met OMEGA*

Door de gekozen ligging van de zendstations is het mogelijk overal op aarde minimaal drie stations te ontvangen, maar meestal meer, zodat selectie van de beste drie mogelijk is. Aangezien de in fase te vergelijken e.m. golven niet gelijktijdig gezonden worden, kan als hulpbron een lokale referentie-oscillator R dienst doen. We bepalen dan:

$$\varphi_A - \varphi_B = (\varphi_A - \varphi_R) - (\varphi_B - \varphi_R)$$

waarbij $\varphi_A$ de fase is van het signaal afkomstig van station A, $\varphi_B$ van station B en $\varphi_R$ van de lokale oscillator R.

Evenzo kunnen we met behulp van station C bepalen:

$$\varphi_A - \varphi_C = (\varphi_A - \varphi_R) - (\varphi_C - \varphi_R)$$

We hebben nu twee hyperbolen. Als we weten in welke lanes we ons bevinden kunnen we met behulp van OMEGA coördinatentabellen of OMEGA kaarten onze positie vinden. De lokale oscillator moet uiteraard stabiel zijn over de periode van tien seconden.

Een andere navigatiemethode in het OMEGA systeem is de zgn. 'rho-rho' navigatie. Bij deze methode meten we de faseveranderingen van twee of meer OMEGA stations t.o.v. een stabiele lokale oscillator als we ons verplaatsen. Gewoonlijk gebruikt de ontvanger de 10,2 kHz uitzendingen volgens fig. 2.

Als zender A met fase 0° zendt, dan is de fase $\varphi_A$, waarmee dit signaal de ontvanger in de haven van vertrek bereikt, bekend. We weten immers de afstand tot het zendstation en de voortplantingssnelheid van de e.m. golf. Dit geldt ook voor de fase $\varphi_B$ van het signaal afkomstig van zender B. De ontvanger wordt ingesteld op deze beginwaarden $\varphi_A$ en $\varphi_B$. Als tijdens de verplaatsing de faseverandering $\Delta\varphi_A$ gemeten wordt, dan is de afstandsverandering t.o.v. zender A en het teken hiervan bekend. De cirkel met zender A als middelpunt, waarop het schip zich bevindt, is dus bekend. Op dezelfde manier kan de cirkel met zender B als middelpunt worden bepaald. Deze twee cirkels hebben 2 snijpunten, waarvan het juiste als positie van het schip, niet moeilijk te onderscheiden is.

De lane-breedte als afstand tussen twee opvolgende 0° positielijnen is bij deze methode de golflengte $\lambda$ van de gebruikte frequentie (fig. 4).

*De lane-identificatie*

Bij gebruik van het hyperbolische systeem is het noodzakelijk dat we weten in welke lane we ons bevinden. Is, om welke reden dan ook, het lane-nummer niet bekend, dan kunnen we proberen de juiste lane te vinden met behulp van andere navigatie-

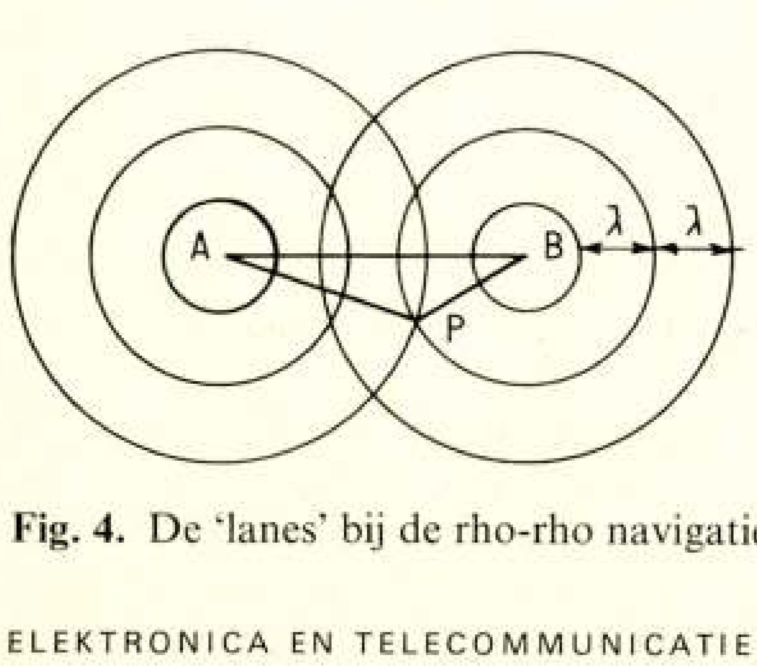



**Fig. 4.** De 'lanes' bij de rho-rho navigatiemethode.

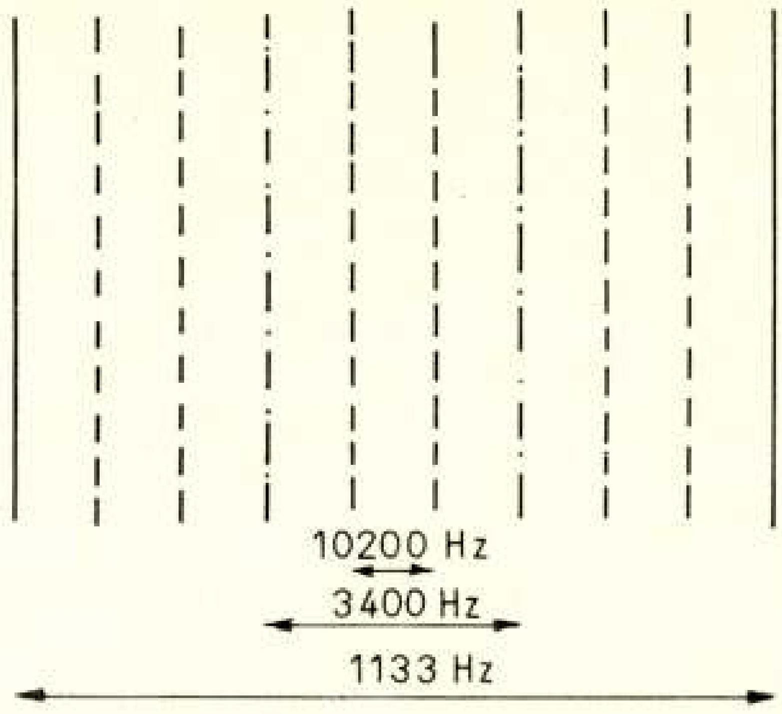



**Fig. 5.** Breedte van de 'lane' voor 10,2 kHz vergeleken met die van de verschilfrequentie van 10,2 kHz met 13,6 kHz en $11\frac{1}{3}$ kHz.

middelen, of door gebruik te maken van andere OMEGA frequenties. Zo is het mogelijk om de verschilfrequentie van 13,6 kHz en 10,2 kHz of van 10,2 kHz en $11\frac{1}{3}$ kHz te nemen. Deze frequenties geven een 3- respectievelijk 9-maal zo brede lane (fig. 5). Ook de modulatiefrequentie in het OMEGA systeem kunnen voor lane-identificatie gebruikt worden.

De stabiliteit van de evenbedoelde laagfrequente mengsignalen is echter zeer moeilijk te handhaven. Volgens de Amerikaanse literatuur hebben experimenten niettemin de bruikbaarheid ervan bewezen.

Tabel 1 geeft een overzicht van de voor lane-identificatie in aanmerking komende frequenties, de lane-breedte, de maximaal toegestane $\sigma$ (standaarddeviatie) van de metingen en de periodetijd.

**Tabel 1.** Gegevens bij lane-identificering.

| Frequentie (Hz) | $\lambda/2$ (km) | $\sigma_{max.}$ (μ s) | Periode (μ s) |
|---|---|---|---|
| 10 200 | 14,7 | — | 98 |
| 3 400 | 44 | 16 | 294 |
| 1 133$\frac{1}{3}$ | 132 | 49 | 882 |
| 226$\frac{2}{3}$ | 662 | 147 | 4 412 |
| 45$\frac{1}{3}$ | 3 309 | 735 | 22 060 |
| 11$\frac{1}{3}$ | 13 236 | 3 680 | 88 240 |

*Propagatie*

Voor de OMEGA frequenties van 10 kHz ... 14 kHz kan, zeker op grote afstand, het grootste deel van de door de zenders uitgestraalde energie beschouwd worden als zich voortplantend in een golfpijp, begrensd door de aarde en een geleidende ionosfeer. Frequenties lager dan 10 kHz krijgen een te grote demping omdat ze, speciaal overdag, te dicht in de buurt komen van de golfpijp-afsnijfrequentie. Bij frequenties hoger dan de in het OMEGA systeem gebruikte gaat uiteindelijk een groot deel van de energie over naar de 2e-orde mode die wordt opgewekt. De demping van de 1e-orde mode is echter kleiner dan die van de 2e-orde mode, zodat na ca. 2500 km nauwelijks meer te voorspellen faseverstoringen zullen optreden. De keuze van 10 kHz ... 14 kHz is dus duidelijk.

Andere factoren, die grote invloed hebben op de voortplanting van de golven zijn:

a. de frequentiedispersie, daar de voortplantingssnelheid in de 'golfpijp' tussen aardoppervlak en ionosfeer een functie van de frequentie is;

b. de richtingsafhankelijkheid van demping en propagatiesnelheid;
c. de grote variaties in geleidbaarheid van de aarde;
d. variaties in de voortplantingssnelheid als gevolg van de wisselende effectieve ionosfeerhoogte $h$; als correctie zijn de zgn. 'Sky Wave Correction Tables' samengesteld. Zo geldt o.a.: voor 10,2 kHz: $h$ = 69,5 km overdag resp. 86,5 km 's nachts; voor 13,6 kHz: $h$ = 70,5 km overdag resp. 87,0 km 's nachts.

*De zenders*

Bij gebruik van het hyperbolische navigatiesysteem is het noodzakelijk dat er een vaste faserelatie bestaat tussen de zenders. Elk OMEGA zendstation heeft vier cesium atoomstandaarden, waarvan de gemiddelde fase genomen wordt. Bovendien wordt de goede lange-duur stabiliteit van de atoomstandaarden gecombineerd met de korte-tijd stabiliteit van kwartskristallen.

Op het zendstation in Forestport worden de fasefluctuaties minimaal gehouden. Hier worden de uitzendingen van de overige stations nauwkeurig gevolgd en indien nodig worden correctieopdrachten verstrekt op basis van 60 dagen waarnemen.

*De nauwkeurigheid*

Als het systeem volledig operationeel is wordt verwacht, dat 95% van de 'fixes' (= uitkomsten van plaatsbepalingen) zullen liggen binnen een cirkelvormig gebied met een straal van 1,5 km overdag en 3,5 km 's nachts, rondom de juiste plaats als middelpunt. De nauwkeurigheid is nu nog sterk plaatsafhankelijk. Nederland ligt bijzonder ongunstig voor waarnemingen in het experimentele stadium. Verbetering kan men verwachten van nauwkeurig *gemeten* 'Sky Wave Correction Tables' (tot nu toe zijn deze hoofdzakelijk gebaseerd op berekeningen) en het toepassen van differential-OMEGA, waarbij een vast ontvangstation de nodige correcties meet en doorgeeft aan gebruikers in een bepaald gebied.

Er zijn plannen geweest, maar v.z.b. niet uitgevoerd, om boeien in de oceaan te leggen met meet- en registratie-apparatuur. Een controlecentrum zou dan via een satelliet de boeien opdracht kunnen geven om de gegevens die verzameld zijn weer via de satelliet naar het controlecentrum te zenden. Dit zou de nauwkeurigheid van de berekende 'Sky Wave Correction Tables' aanzienlijk kunnen vergroten.

De nauwkeurigheid wordt ook beïnvloed door de signaal/ruisverhouding. In automatische ontvangers, waar het synchronisatiekenmerk aan de lengtecodering van de uitzendingen wordt ontleend, treedt een verslechtering op in de signaal/ruisverhouding doordat het looptijdverschil tussen de uitzendingen van twee geografisch uiteengelegen zenders moet worden opgevangen. Dit kan ca. 0,06 s bedragen. Hierdoor ontstaat een variatie van ca. 0,06 s in de ontvangst van de pauze tussen twee uitzendingen, welke aan de zendzijde op 0,2 s is ingesteld. De hiervoor benodigde extra bandbreedte voor detectie veroorzaakt een verslechtering van ca. 11 dB in de signaal/ruisverhouding. De aan boord van vliegtuigen geplaatste ontvangers moeten bovendien een zodanig grote bandbreedte bezitten dat het signaal ondanks de dopplerverschuiving, veroorzaakt door de snelheid van het vliegtuig, gevolgd kan worden.

## Het TRANSIT systeem

*Inleiding*

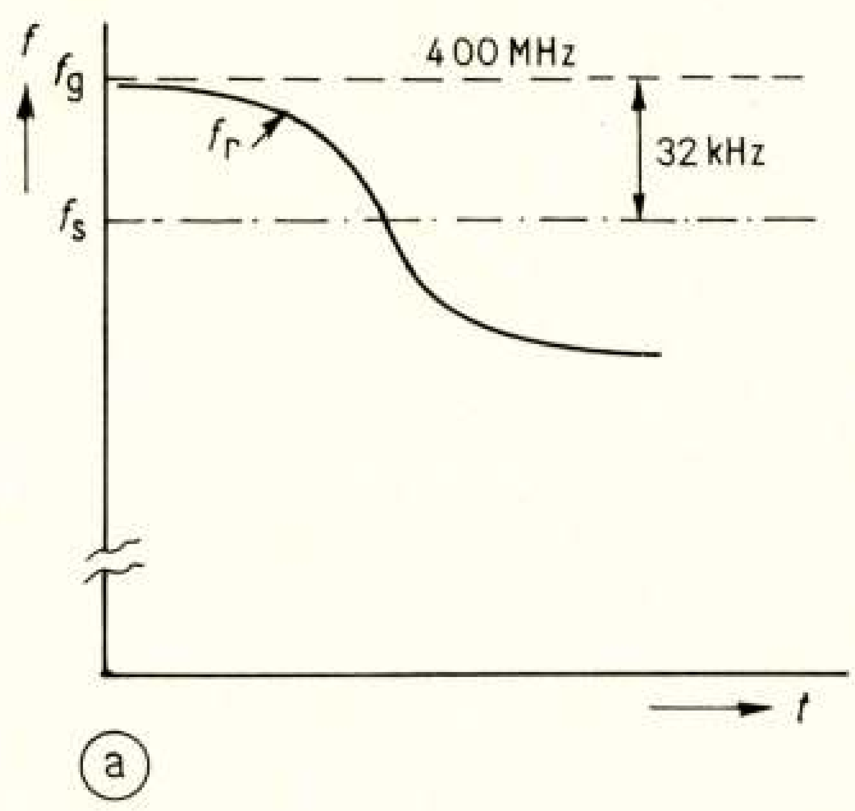
Op verzoek van de Amerikaanse Marine is dit satelliet-navigatiesysteem ontwikkeld door het Applied Physics Laboratory van de Johns Hopkins University. De bestaande navigatiesystemen hadden een nauwkeurigheid die voor bepaalde doeleinden onvoldoende was. De communicatie heeft in dit systeem een grote plaats gekregen, slechts $\frac{1}{6}$ deel van de gezonden boodschap is bestemd voor de navigatie.

Sinds januari 1964 is er steeds minstens één satelliet voor dit systeem in omloop geweest. Ongeveer 5 jaar geleden hebben de firma's Honeywell, Magnavox en ITT een overeenkomst met de Amerikaanse regering gesloten die het mogelijk maakt navigatieontvangers op de markt te brengen.

*De werking van het systeem*

Het principe van het TRANSIT systeem is, dat men de eigen plaats op aarde kan bepalen als men nauwkeurig de dopplerverschuiving van de door de satelliet gezonden draaggolf meet en de baan van de satelliet bekend is. Het signaal dat de satelliet zendt heeft een offset-frequentie om de tekeninformatie van de dopplerverschuiving na menging niet verloren te laten gaan (fig. 6a). Voor het binnenkomende signaal $f_r$ geldt $f_r = f_s + f_d$, waarin $f_s$ de door de satelliet gezonden frequentie is en $f_d$ de dopplerverschuiving. Dit signaal mengen we met de in de ontvanger opgewekte frequentie $f_g$, hetgeen ons de frequentie $f_g - (f_s + f_d)$ levert (fig. 6b). Praktische waarden zijn: $f_g$ = 400 MHz en $f_g - f_s$ = 32 kHz.

Het satellietsignaal heeft een symmetrische fasemodulatie, ten einde het gemiddelde aantal perioden dat per seconde wordt uitgezonden, constant te laten zijn. In het gedeelte van de bood-



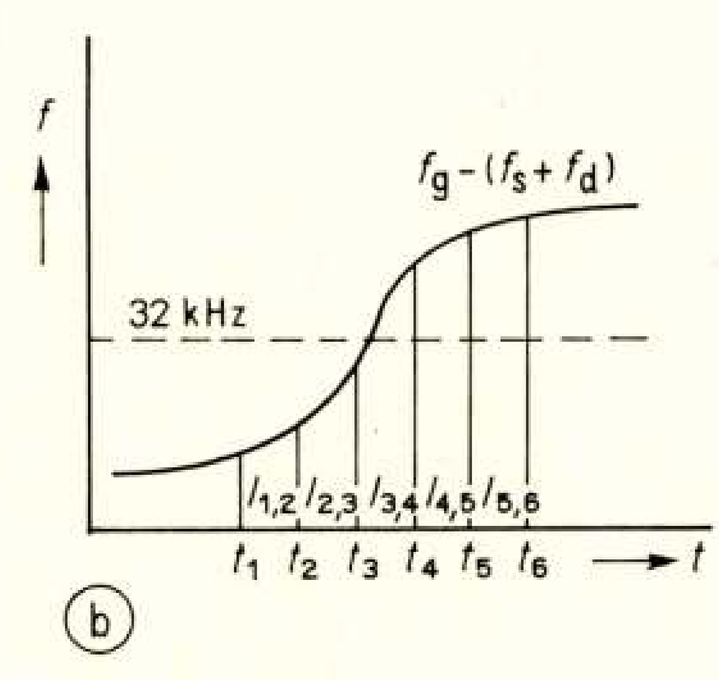




**Fig. 6.** Dopplerverschuiving t.o.v. de door een navigatiesatelliet uitgezonden frequentie $f_s$, als functie van de tijd.
a. frequentie $f_r$, ontvangen op de meetplaats.
b. frequentieverloop als functie van de tijd na mengen met de ontvangerfrequentie $f_g$.

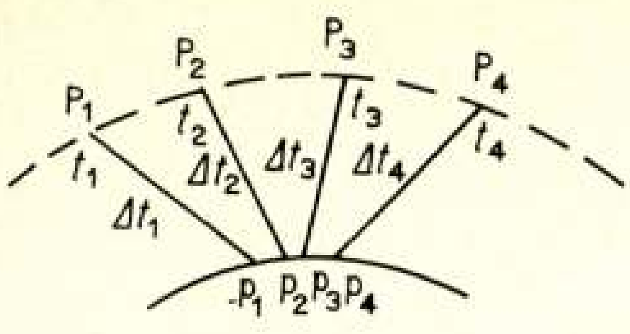



**Fig. 7.** Samenhang tussen de positie van een navigatiesatelliet, de plaats van een mobiele post op aarde en de in de post opgevangen tijdsignalen.

schap, dat bestemd is voor de navigatie, zendt de satelliet gegevens waaruit haar baan berekend kan worden. De satelliet geeft bovendien om de twee minuten tijdinformatie.

Stel, dat de *satelliet* zich op het tijdstip $t_1$ in het punt $P_1$ bevindt, en dan een tijdsignaal uitzendt. Dit signaal wordt door de *navigator* op het tijdstip $t_1 + \Delta t_1$ ontvangen op de plaats $p_1$, als $\Delta t_1$ de looptijd van het signaal is (fig. 7). Hetzelfde geldt voor $P_2, p_2, \Delta t_2$, voor $P_3, p_3, \Delta t_3$ en voor $P_4$, $p_4$, $\Delta t_4$. In de ontvanger wordt de volgende integraal bepaald:

$$I_{1,2} = \int_{t_1+\Delta t_1}^{t_2+\Delta t_2} (f_g - f_r)\, dt \qquad (1)$$

Het verkrijgen van deze integraal is in feite niets anders dan het (tussen de als start- en stopsignalen te gebruiken tijdsignalen) tellen van het aantal binnenkomende (in frequentie getransformeerde) perioden.

Bepaald worden evenzo de integralen $I_{2,3}$ en $I_{3,4}$. Voorts is:

$$I_{1,2} = (t_2 + \Delta t_2 - t_1 - \Delta t_1)\, f_g - \int_{t_1+\Delta t_1}^{t_2+\Delta t_2} f_r\, dt \qquad (2)$$

Volgens het beginsel, dat perioden behouden blijven, geldt:

$$\int_{t_1+\Delta t_1}^{t_2+\Delta t_2} f_r\, dt = \int_{t_1}^{t_2} f_s\, dt = (t_2 - t_1)\, f_s$$

Ingevuld in (2) ontstaat:

$$\begin{aligned} I_{1,2} &= (t_2 + \Delta t_2 - t_1 - \Delta t_1) f_g - (t_2 - t_1) f_s \\ &= (t_2 - t_1)(f_g - f_s) + (\Delta t_2 - \Delta t_1) f_g \end{aligned}$$

Hieruit volgt:

$$\Delta t_2 - \Delta t_1 = \frac{I_{1,2} - (t_2 - t_1)(f_g - f_s)}{f_g} \qquad (3)$$

Bovendien geldt:

$$P_2 p_2 - P_1 p_1 = c\,(\Delta t_2 - \Delta t_1) \qquad (4)$$

waarbij $c$ de lichtsnelheid is.

Uit (3) en (4) resulteert het volgende stelsel vergelijkingen:

$$\left.\begin{aligned} P_2 p_2 - P_1 p_1 &= \frac{c}{f_g} I_{1,2} - \frac{c(f_g - f_s)(t_2 - t_1)}{f_g} \\ P_3 p_3 - P_2 p_2 &= \frac{c}{f_g} I_{2,3} - \frac{c(f_g - f_s)(t_3 - t_2)}{f_g} \\ t_2 - t_1 &= t_3 - t_2 = t_4 - t_3 \end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

Als de snelheid en de koers van de navigator nu bekend is, kan uit deze drie vergelijkingen de plaats bepaald worden. De term

$\dfrac{c(f_g - f_s)(t_2 - t_1)}{f_g}$ vereist voor de lokale oscillator een

stabiliteit van $1 : 10^9$. Dit is een,te zware eis voor een ontvanger. Daarom nemen we ook de volgende vergelijking mee:

$$P_4 p_4 - P_3 p_3 = \frac{c}{f_g} I_{3,4} - \frac{c(f_g - f_s)(t_4 - t_3)}{f_g}$$

Samen met (5) geeft dit de betrekkingen:

$$P_3 p_3 - 2 P_2 p_2 + P_1 p_1 = \frac{c}{f_g}(I_{2,3} - I_{1,2})$$

$$P_4 p_4 - 2 P_3 p_3 + P_2 p_2 = \frac{c}{f_g}(I_{3,4} - I_{2,3})$$

Deze vergelijkingen eisen voor een voldoend nauwkeurige plaatsbepaling een stabiliteit van $1 : 10^5$.

Om programmatechnische redenen is het noodzakelijk *gegist bestek* in te voeren. Het TRANSIT systeem is een hyperbolisch systeem; we zoeken namelijk het snijpunt van het stelsel hyperboloïden, gegeven door de vergelijkingen onder (5).

*De refractie*

Om de invloed van het transmissiemedium op de nauwkeurigheid van het systeem te verkleinen zendt de satelliet uit op twee frequenties, te weten 400 MHz en 150 MHz. Als $f_{r,h}$ het ontvangen hoogfrequente signaal is, $f_h$ de gezonden frequentie, $\Delta f_h$ de dopplerverschuiving en $\varepsilon_{f\,h}$ de frequentieverschuiving ten gevolge van ionosferische refractie, dan wordt ontvangen:

$$f_{r,h} = f_h + \Delta f_h + \varepsilon_{f_h} \qquad (6)$$

Voor de ontvangst van het laagfrequente signaal $f_l$ geldt:

$$f_{r,l} = f_l + \Delta f_l + \varepsilon_{f\,l} \qquad (7)$$

$\varepsilon_f$ is omgekeerd evenredig met de frequentie; dus als gesteld wordt $f_h = k f_l$ kunnen we vergelijking (7) schrijven als:

$$f_{r,l} = f_l + \Delta f_l + k\varepsilon_{f_h}$$

Dit levert:

$$k f_{r,l} = k f_l + k \Delta f_l + k^2 \varepsilon_{f_h}$$

of wel:

$$k f_{r,l} = f_h + \Delta f_h + k^2 \varepsilon_{f_h}$$

Gecombineerd met vergelijking (6) leidt dit tot:

$$k f_{r,l} - f_{r,h} = (k^2 - 1)\, \varepsilon_{f_h}$$

zodat:

$$\varepsilon_{f_h} = \frac{k f_{r,l} - f_{r,h}}{k^2 - 1}$$

In de ontvanger kunnen we deze correctieterm bepalen. De orde van grootte is 2000 Hz voor het 400 MHz kanaal. Voor de momenteel te bereiken nauwkeurigheid blijkt deze eerste-orde benadering voldoende.

*De baan van de satelliet*

Om de positie van de navigator te berekenen is het noodzakelijk de baan, die de satelliet t.o.v. de aarde beschrijft, nauwkeurig

te weten. In Maine, Minnesota, California en Hawaii zijn daartoe op zeer nauwkeurig bekende plaatsen ontvangers geïnstalleerd. De gegevens van deze ontvangers gaan naar het rekencentrum in Point Mugu, California. De baan die uit deze gegevens volgt, wordt geëxtrapoleerd, omgezet in parameters, gecodeerd en via één van de twee injectiestations opgeslagen in het 24 k bit geheugen van de satelliet. Deze injecties vinden tweemaal per dag plaats. In de eerste jaren van dit systeem was de extrapolatie van de baan een uitermate moeilijke zaak, na twaalf uur lag de voorspelde plaats vaak 1 mijl verwijderd van de juiste plaats. De belangrijkste oorzaak hiervan was de onvoldoende kennis van het zwaartekrachtveld. Om hierin verbetering te brengen is er een 'tracking network' van over de wereld verspreide ontvangers ingericht. Om de gemeten dopplerkrommen zo goed mogelijk overeen te laten komen met de theoretische krommen is een rekenprogramma ontwikkeld dat, naast de zwaartekrachtscoëfficiënten, de coördinaten van de stations in het 'tracking network' als variabelen beschouwt. Ook zijn er speciale geodetische satellieten gelanceerd om het aardse gravitatieveld te onderzoeken, zoals ANNA in 1962 en GEOS in 1965. De resultaten van deze onderzoekingen hebben geleid tot het samenstellen van geografische hoogtekaarten, te gebruiken bij het navigeren met het TRANSIT systeem.

*De nauwkeurigheid*

De positienauwkeurigheid na het invoeren van de bepaalde zwaartekrachtscoëfficiënten is ca. 200 m. De voornaamste foutoorzaken zijn:

a. slechte signaal/ruisverhouding in bepaalde gevallen;
b. verkeerd ingevoerde antennehoogte; 1 m fout in antennehoogte komt overeen met een positiefout van 5 m;
c. verkeerd ingevoerde snelheid; een vuistregel is: 1 knoop (= 1,852 km/h) fout in snelheid geeft een positiefout van 0,2 zeemijl (= 0,37 km);
d. onzekerheid in de koers.

De nauwkeurigheid van het systeem kan zeker nog opgevoerd worden. Door de antennehoogte als variabele in te voeren bij herberekening van een aantal fixes, gemaakt op één plaats, treedt duidelijk 'cluttering' op bij de juiste antennehoogte. Ook een voortgezette studie van ionosferische en troposferische invloeden en verdergaande verfijning in de beschrijving van het zwaartekrachtveld zal de nauwkeurigheid positief beïnvloeden. dat het best mogelijke nog niet bereikt is blijkt als we de fixes van zuid- en noordgaande satellieten scheiden, en ook als de scheiding aangebracht wordt in het links of rechts passeren.

Er blijkt, over een aantal waarnemingen gemiddeld, dat zuidgaande satellieten een afwijking zuid, noordgaande een afwijking noord, westpasserende een afwijking west en oostpasserende een afwijking oost vertonen. Bij een tot een maximum opgevoerde nauwkeurigheid mag dit niet geconstateerd worden. Hoewel de juiste oorzaak nog niet gevonden is, wordt meestal de onvolledig bekende zwaartekracht de boosdoener genoemd. Persoonlijk geloof ik dat de invloed van verschillende propagatiefactoren hierbij zeker niet vergeten mag worden. Ook bij dit navigatiesysteem wordt de 'differential' methode toegepast.

*De nadelen*

Het TRANSIT systeem werkt met 4 satellieten in polaire banen, die ieder ca. 45° geografische lengte uit elkaar liggen. Het grote nadeel is dat men vaak lang (tot $1\frac{1}{2}$ h) moet wachten voor er een satelliet met bruikbare elevatiehoek langs komt. Dit zou opgelost kunnen worden door een groter aantal satellieten te lanceren. Er zijn plannen om tot een aantal van 24 te gaan, zodat het mogelijk zal zijn continu een satelliet te volgen. Het is dan wel noodzakelijk om gerichte ontvangantennes te gaan gebruiken (in plaats van de nu gebruikelijke antennes die vast opgesteld staan), omdat elke satelliet op dezelfde frequenties zendt.

Een ander nadeel is de lange tijd die nodig is om een fix te bepalen. Ook als we 'short doppler integration' toepassen, d.w.z. dat de dopplerverschuiving niet over 2 min maar over een periode van 10 ... 30 s geïntegreerd wordt, duurt het minimaal 2 min vóór we de eerste plaatsbepaling krijgen, en wel wegens het feit dat het 2 min duurt voor de satelliet één boodschap met alle baangegevens verstuurd heeft.

**Extrapolatie naar toekomstige systemen**

De zojuist genoemde mogelijkheid om continu een satelliet te volgen heeft bovendien het bezwaar dat men de antenne telkens op een andere satelliet moet richten. Voor een stilstaande waarnemer geldt dat hij onder speciale omstandigheden één satelliet niet langer dan 20 min kan volgen. Om dit te vermijden is men gaan denken aan het lanceren van synchrone satellieten.

Het volgende punt van discussie is de keuze van een interferometrisch of een hyperbolisch systeem. Men stelt dat het systeem 'hyperbolisch' is als de afstand tot de waarnemer minder dan 10 maal de basislengte bedraagt, en 'interferometrisch' bij een afstand van minstens 1000 maal de basislengte. Hiertussen worden beide benamingen gebruikt.

Het faseverschil $\varphi$, gemeten tussen de aankomende signalen van 2 stations wordt gegeven door de formule:

$$\varphi = \frac{2\pi D}{\lambda} \sin \theta$$

waarin:

$D$ = afstand tussen de stations
$\lambda$ = golflengte van de gezonden frequentie
$\theta$ = hoek van inval, als hoek tussen de normaal op de basislijn en de lijn van het signaal naar het ontvangstation

De gevoeligheid van het systeem wordt dan gegeven door:

$$\frac{d\varphi}{d\theta} = \frac{2\pi D}{\lambda} \cos \theta$$

Voor synchrone satellieten kunnen we $\cos \theta \approx 1$ stellen. Als we van een systeemnauwkeurigheid van 10 m uitgaan wordt de gevoeligheid 1 : 165000; dit betekent bij een frequentie van 1 GHz een afstand tussen de antennes van 8,8 km. Deze grote afstand maakt het onmogelijk de antennes aan één satelliet te bevestigen, afgezien nog van het vermogensverlies dat in de kabels tussen de satelliet en de antennes zou optreden. De huidige stand van zaken in de rakettechniek is, dat een dergelijk gewicht niet gelanceerd kan worden. Bovendien zijn er 4 antennes nodig om te voorkomen dat de antennes 2 maal per 24 uur in één vlak met de aardas komen te liggen.

Een en ander houdt dus een technisch vrijwel niet te realiseren idee in. Daarom is een plan uitgewerkt om een aantal satellieten met een vaste hoek van inclinatie te lanceren. Als de ellipticiteit van de banen gelijk is, en de halve hoofdassen gelijk zijn, doch een andere stand in de ruimte innemen, achtervolgen de 'schaduwpunten' van de satellieten elkaar in een cirkel. (Onder 'schaduwpunt' is te verstaan het snijpunt met het aardoppervlak van de verbindingslijn tussen de satelliet en het middelpunt van de aarde.) Deze methode geeft tevens de oplossing voor het probleem dat ook de poolstreken bereikt moeten kunnen worden. Als we uitgaan van een hoek van inclinatie van 30° en een ellipticiteit van 0,262, kan een wereldomvattend

navigatiesysteem worden opgebouwd met 3 groepen van elk 7 satellieten.

Als we nu nog een stap verder gaan en bedenken dat vliegtuigen het grootste deel der gebruikers zullen zijn, dan dient zich ten deze, de behoefte aan wereldomvattende 'air-traffic control' aan. Dit te meer, doordat het verkeer boven de oceanen sterk toeneemt en boven de Atlantische Oceaan mogelijk een verzadigingspunt gaat bereiken.

Verwacht wordt dat in 1974 in de spitsuren 250 vliegtuigen tegelijk zullen deelnemen aan het luchtverkeer boven de Noord-atlantische Oceaan. Dit verkeer kan volgens de nu geldende regels m.i. niet 100% veilig verwerkt worden. Een wereldomvattende air-traffic control is daarom noodzakelijk. De mogelijkheid hiertoe biedt het Amerikaanse NAVSTAR systeem. Het is de bedoeling dat dit systeem in 1974/1975 operationeel wordt; het maakt gebruik van 4 satellieten in een Y-vorm. Hierdoor is het onmogelijk dat op welk punt op aarde en op welk tijdstip dan ook, géén drie satellieten op één lijn liggen. De hiervoor benodigde 4 satellieten bieden tevens het voordeel dat de waarnemer geen gegist bestek en geen tijd behoeft in te voeren om een positie te kunnen berekenen. Het NAVSTAR systeem is bedoeld voor het vervullen van een drietal functies:

1. navigatie;
2. communicatie;
3. air-traffic control.

*Ad* 1. Het navigatie-gedeelte is passief. Elke gebruiker kan zijn positie bepalen met behulp van de vier satellieten.

Als mogelijke modulatiesignalen, bestemd voor het navigeren, zijn onderzocht:

a. Sinusvormige modulatie; de fase van de binnenkomende signalen bevat de afstandsinformatie, terwijl een aantal frequenties samen gebruikt worden om de 'meerduidigheid' op te lossen. Deze modulatie is erg gevoelig voor ruis en interferentie.

b. Een in frequentie gezwaaide sinus in het audiogebied. Problemen komen hier op het gebied van de mogelijke 'dubbelzinnigheid' en van de zwaaisnelheid i.v.m. signaal/ruisverhoudingen. Ook deze methode is gevoelig voor ruis en interferentie.

c. 'Pseudo-random noise codes'. Deze vorm van binaire modulatiesignalen heeft het voordeel van geringe gevoeligheid voor interferentie. Een nadeel is de lange acquisitietijd.

d. 'Binor' modulatiesignalen, eveneens een vorm van een binair signaal. Dit signaal heeft ook de ongevoeligheid voor interferentie, maar heeft geen lange acquisitietijd nodig. Deze methode zal waarschijnlijk toegepast gaan worden.

*Ad 2.* De mogelijkheid bestaat om maximaal 30 spraakkanalen per 4 satellieten in te bouwen.

*Ad 3.* In verschillende kustgebieden langs de oceanen worden grote luchtverkeersgeleiding stations gebouwd. Deze stations kunnen zgn. 'Location Identification Pulses' naar een vliegtuig zenden via een satelliet. De pulsen kunnen een corresponderende zender in werking stellen, die weer via een satelliet gegevens terugzendt naar het grondstation, dat dan kan bepalen waar elk vliegtuig zich bevindt.

**Literatuur**


[1] AGARD Papers presented at the AGARD Avionics Panel Meeting, held in Instanbul, 3 ... 8 Oct. 1960: Navigation Systems for Aircraft and Space Vehicles.

[2] AGARDOGRAPH 105: Space Navigation Guidance and Control.

[3] AGARD Conference Proceedings No. 28: Advanced Navigational Techniques 1970.


## Korte technische berichten

### Processor-bestuurde telefooncentrale te Rotterdam in gebruik gesteld

Op 22 december jl. werd de nieuwe Tweede Districtstelefooncentrale te Rotterdam officieel in gebruik gesteld. Het is een processor-bestuurde centrale van het type AKE 13, geleverd door de telefoonmaatschappij LM Ericsson, te Stockholm (fig. 1).

Van ervaringen, met processor-bestuurde *lokale centrales* opgedaan, zijn reeds diverse publikaties verschenen (zie o.a. 'De Ingenieur' 1971, nr. 36, blz. ET 111). Bij deze nieuwe centrale is er niettemin sprake van een wereldprimeur, daar, voor zover bekend, dit de eerste processor-bestuurde *verkeerscentrale* ter wereld is. De centrale heeft tot taak, het interlokale en internationale telefoonverkeer in het telefoondistrict Rotterdam af te wikkelen.

Het spreekwegennetwerk is uitgevoerd met zgn. codeschakelaars. Dergelijke schakelaars, die een digitale instelling bezitten, worden ook wel in conventionele centrales toegepast; zij hebben bewezen een betrouwbaar schakelmiddel te zijn.

De centrale te Rotterdam kan momenteel het verkeer afwikkelen van 2400 inkomende lijnen; een uitbreiding tot ongeveer 13 000 inkomende lijnen mag in de toekomst worden verwacht. Het tot stand brengen van verbindingen tussen inkomende en uitgaande lijnen wordt uitgevoerd met behulp van processoren. Per processor kan het verkeer van ongeveer 1700 lijnen, elk met een verkeerswaarde van 0,8 erlang, worden afgewikkeld. Op dit ogenblik bestaat het besturingsdeel van de Rotterdamse centrale uit twee processoren, die elk een deel van de uit te voeren werkzaamheden verrichten.

Het geheel is een multiprocessor systeem waarin maximaal acht processoren kunnen worden opgenomen. De processoren, elk voor zich in tweevoud uitgevoerd, staan in verbinding met het spreekwegennetwerk via aanpassingsapparatuur die de snelheidsaanpassing tussen de snelle processoren en de langzamere codeschakelaars bewerkstelligt. Voor elke handeling is dus een processorpaar beschikbaar, zodat bij het optreden van 'hardware'-fouten de functie van de ene processorhelft door de andere kan worden overgenomen. Wanneer in de hardware van een processor een fout optreedt, wordt de foutieve eenheid door middel van foutdetectieprogramma's opgespoord en daarna afgeschakeld. Hierdoor wordt een zeer grote betrouwbaarheid verkregen; tevens wordt een storingsvrije afwikkeling van het telefoonverkeer gewaarborgd.

De processoren bezitten een programmageheugen van 128k woorden bij een 16-bits woordlengte. Het totale programmapakket omvat 156k woorden, waarvan er 118k permanent in het programmageheugen aanwezig zijn; het resterende aantal van 39k heeft betrekking op programma's die – voor tijdelijk gebruik – door een operateur in een vrij gebied van het programmageheugen ingelezen kunnen worden. Regelmatig voor-

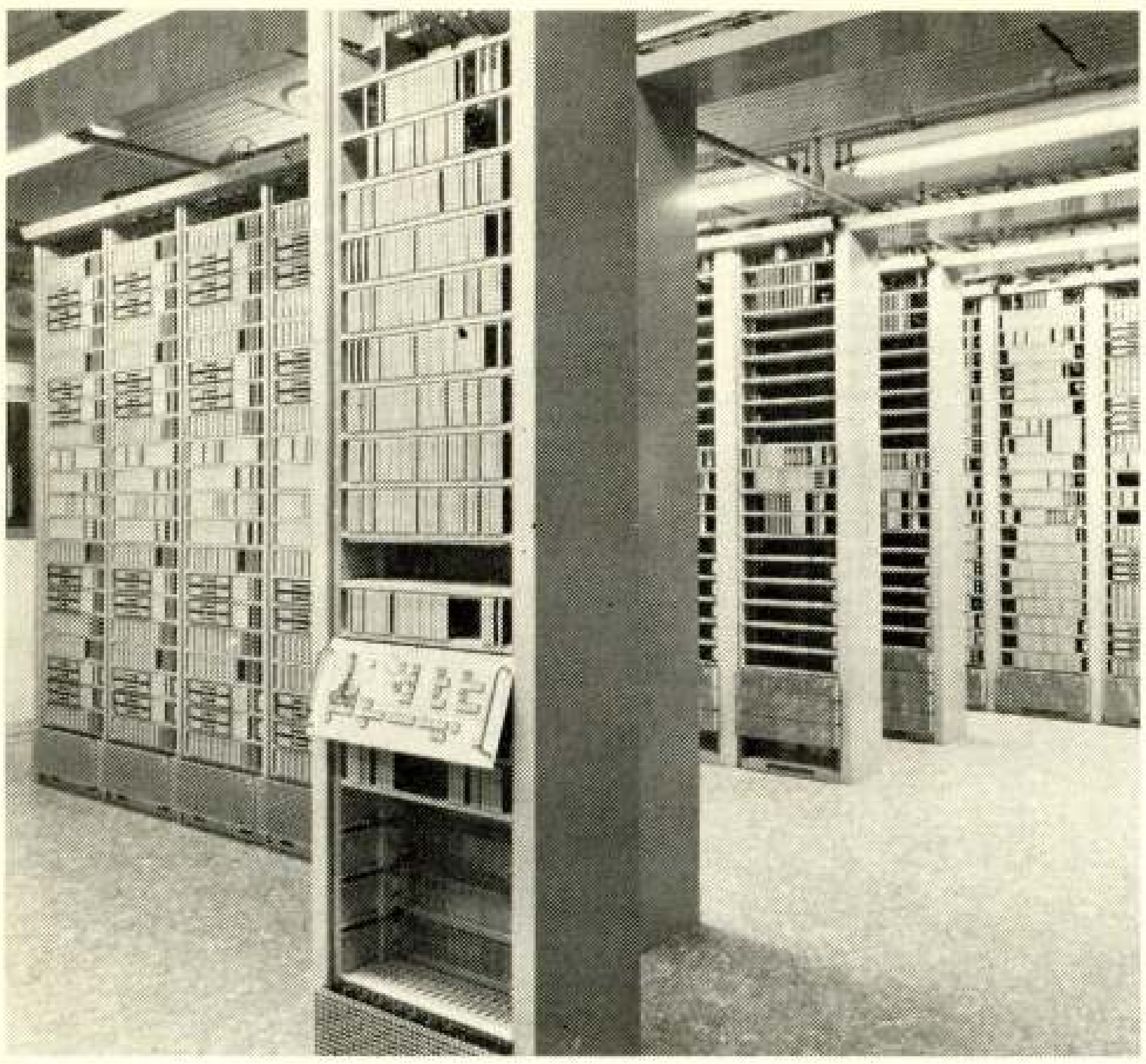


**Fig. 1.** Interieur van de processorruimte in de Tweede Districtscentrale te Rotterdam, nabij de Waalhaven (*foto Meco-Foto, Breda*).

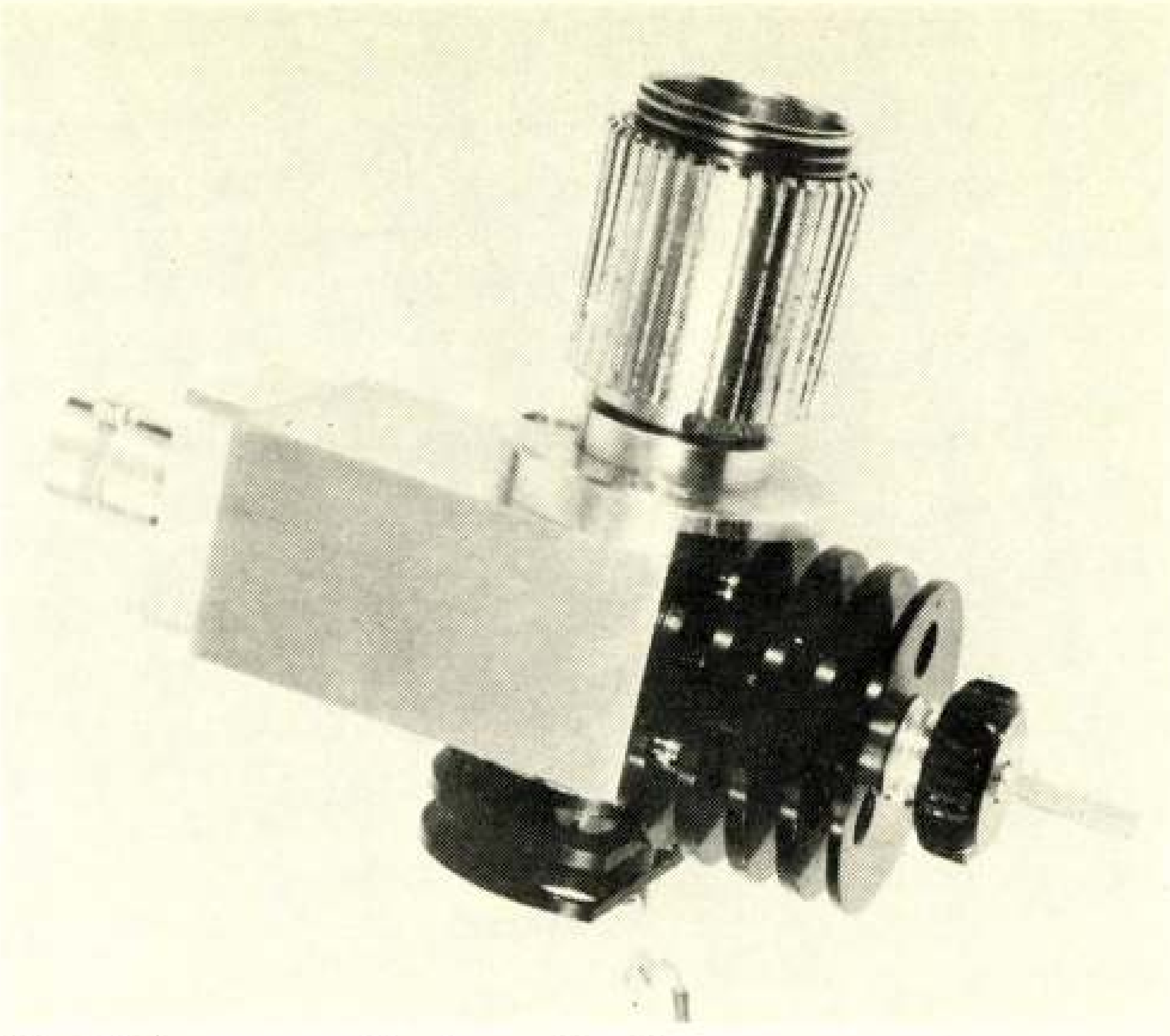


**Fig. 2.** De gemonteerde microgolfoscillator.

komende wijzigingen, zoals veranderingen van het netnummer, enz., hebben in dit systeem slechts de betekenis van eenvoudige datawijzigingen; deze kunnen dan ook sneller en eenvoudiger worden uitgevoerd dan in conventionele telefoonsystemen. In het algemeen worden wijzigingen uitgevoerd door bestaande programma's te veranderen of nieuwe programma's in te voeren. Het wijzigen van bedradingen en dergelijke, zoals dat in conventionele centrales plaatsvindt, blijft dus achterwege.

*'Aangetekend', PTT.*

*

**Zeer breedbandige microgolfoscillator**

In de 'Mullard Research Laboratories' te Salfords, Engeland (waar een deel van de internationale Philips research is ondergebracht), heeft men een coaxiale Gunn-oscillator geconstrueerd die door middel van een ingebouwde varactordiode over praktisch de gehele X-band elektronisch kan worden afgestemd (fig. 2). De centrale frequentie is 9,5 GHz, waarbij het totaal afstembare gebied 2,75 GHz beslaat. Over dit gehele frequentiegebied is het uitgangsvermogen meer dan 25 mW bij een kwaliteitsfactor $Q$ van oscillator met trilholte, groter dan 20.

In de proefoscillator wordt een Gunn-diode van het type Mullard CXY19 gebruikt, terwijl met een 70 V silicium varactordiode de afstemming wordt verzorgd. Over het gehele afstembare gebied varieert het afgegeven microgolfvermogen $P_0$ minder dan een factor drie. De temperatuurgevoeligheid is gering; tussen $-25$ °C en $+75$ °C is de variatie van $P_0$ minder dan 25%.

Bij het ontwerp van de trilholte heeft men gestreefd naar een maximaal afstembereik bij een voldoend hoge $Q$-waarde. De varactordiode en Gunn-diode zijn direct in de trilholte gemonteerd en wel zodanig, dat lus- of sondekoppelingsinrichtingen overbodig zijn geworden. De diode-kristalplaatjes (chips) zijn ondergebracht in een standaard S4-omhulling.

Ongewenste effecten in de oscillator, veroorzaakt door het verspringen van de ene trillingswijze naar de andere ('mode jumping'), of extra ruis bij het variëren van de varactorspanning, dan wel gelijkrichtingsverschijnselen in de varactordiode zijn niet aan de dag getreden.

*

*Philips Research Press Release.*

## Uit het NERG

Administratie van het NERG: Postbus 39, Leidschendam. Giro 94746 t.n.v. penningmeester NERG, Leidschendam. Secretariaat van de Examencommissie-NERG: von Geusaustraat 151, Voorburg.

**Personalia**

*Prof. ir. C. A. Muller* is benoemd tot gewoon hoogleraar aan de T.H. Twente in de Afdeling der Elektrotechniek, om onderwijs te geven in de microgolftechniek, met ingang van de dag waarop hij zijn ambt zal aanvaarden ('De Ingenieur' 1972, nr. 2, blz. A 44).

**Ledenmutaties**

*Voorgestelde leden:*

Ir. R. de Haan, Jasmijnlaan 5, Pijnacker.
Ir. D. Ch. van Maaren, de Korverplantsoen 7, Gouda.
Ir. F. P. Ph. de Vries, van Hogendorpstraat 85, Schiedam.
Ir. J. P. de Vries, 2e Schuytstraat 226, 's-Gravenhage.

*Nieuwe adressen van leden:*

Ir. H. Drost, Jan Tooroplaan 4, Heeze.
Ir. E. H. Nordholt, de Ruyterweg 14, Bleiswijk.
Ir. P. den Toonder, Nijhofflaan 11, Dubbeldam.
Ir. Th. J. de Vries, Gen. de Carislaan 18, Eindhoven.
Ir. G. L. Walther, Frederik Hendriklaan 11, Woerden.
Ir. Th. J. Weijers, Burg. Serrarisstraat 74, Heeze.